INVESTIGACION y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

VIDA EN MARTE: DEL MITO A LA REALIDAD

EL SINDROME DE WILLIAMS

INFORME ESPECIAL: COLOSOS DE LA INGENIERIA CIVIL



00257

9 770210 136004

FEBRERO 1998
800 PTAS.




Febrero de 1998 Número 257

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES



Portada: J. Apicella, Cesar Pelli & Associates

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
4-6	Slim Films
7	Arthur Christie
8	Slim Films; fuente: T. P. Martin, Inst. Max Planck para la Investigación del Estado Sólido
9	Arthur Christie; fuente: Martin Schmidt y Hellmut Haberland,
10-11	Centro Espacial Johnson, NASA (*fotografías*); Jennifer C. Christiansen (*composición digital*)
12	Centro Espacial Johnson, NASA (*arriba y centro*), John W. Valley (*abajo*)
13	Centro Espacial Johnson, NASA
14	Laurie Grace
15	Centro Espacial Johnson, NASA
17	Laboratorio de Propulsión a Chorro, NASA
18	Jessica Boyatt
19	Cortesía de Ursula Bellugi
20	Tomo Narashima (*dibujo*); Lisa G. Shaffer, (*micrografías*)
21	Cortesía de Ursula Bellugi (*arriba*); Cortesía de Penguin Putnam, Inc.
22	Tomo Narashima
23	Kind con permiso de la Fundación para el Síndrome de Williams, Ltd., U.K. (*fotografía*); William Allingham, 1870 en *In Fairyland*
36-37	Sano Kazuhiko
38	Cortesía de ABC/KANE PRODUCTIONS
39	Museo Americano de Historia Natural (*izquierda y derecha, arriba*); Steve Rawls (*derecha, abajo*)
40-41	Slim Films (*dibujos*); Bryan Christie (*reproducción digital*)
42-43	Michael Goodman
44	Jared Schneidman Design
45	Will Van Overbeek
47	Juan José Estruch
48	Silvia Nuere
49	Diseño de Devon Brown de Novartis
50-51	Jennifer Feldmann (*a* y *b*), Bill Pritchett (*c*)
52	Juan José Estruch
54-55	Cortesía de Honshu-Shikoku Bridge Authority
56	Roberto Osti (*arriba*); Cortesía de Honshu-Shikoku Bridge Authority (*fotografía y dibujo*); Laurie Grace
57	Honshu-Shikoku Bridge Authority
58-59	K. Yamashita, V. Palmisano, R. Laird, D. Brown y S. Jauntey (*fotografías*); Laurie Grace (*gráficas y dibujo*); Honshu-Shikoku Bridge Authority
62-63	Peter Hyatt
64	J. Mitsui (*arriba*); P. Follet (*abajo*)
65	Peter Hyatt
66-67	Thornton-Tomasetti Engineers (*dibujos*); H. Young (*fotografías*)
68	Thornton-Tomasetti Eng. (*fotografía superior*); Cesar Pelli & Associates
69	J. Pickard
70	Thornton-Tomasetti Engineers
71	J. Apicella
72-81	Andy Ryan
82-84	B. Simon, Documentos PLS (*dibujo*)
85-86	Dana Burns Pizer

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Julio A. Alonso: *Agregados metálicos y números mágicos*; Sonia Ambrós Albesa: *¿Hay vida en Marte?*; Esteban Santiago: *Síndrome de Williams*; José Joaquín Moratalla García: *Reconstrucción del ataque de un dinosaurio*; Juan Pedro Campos: *Aprovechamiento energético del punto cero*; Angel C. Aparicio: *El puente colgante más largo del mundo*; Eugenio Abdilla Muedra: *Los edificios más altos del mundo*; Luis Bou: *Taller y laboratorio* y *Juegos matemáticos*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; José M.ª Valderas Martínez: *Nexos*; J. Vilardell: *Hace...* e *Ideas aplicadas.*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Philip M. Yam, *News Editor*; Ricki L. Rusting, Timothy M. Beardsley y Gary Stix, *Associate Editors*; W. Wayt Gibbs; Kristin Leutwyler; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; David A. Schneider; Glenn Zorpette
Marguerite Holloway y Paul Wallich, *Contributing Editors*
PRODUCTION Richard Sasso
PUBLISHER Joachim P. Rosler
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	8.800	16.000
Extranjero	11.000	20.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pesetas
Extraordinario: 1.000 pesetas

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

POLIESTIRENO. «Durante la guerra en EE.UU. se levantaron fábricas para producir ingentes cantidades de estireno, componente esencial de una variedad de caucho sintético. Sucede además que el estireno puede polimerizarse para dar poliestireno, que es un termoplástico barato y de múltiples aplicaciones. El poliestireno va ya camino de convertirse en el peso pesado de la industria del plástico. Desde una cifra inicial que en 1937 rondaba las 50 toneladas, la capacidad instalada a fines de este año superará las 75.000 toneladas. Sólo uno de sus clientes, la industria de fabricación de frigoríficos domésticos, se espera que consuma este año del orden de las 3500 toneladas.»

...cien años

HUNDIMIENTO DEL “MAINE”. «En el marco de las tensas relaciones entre el gobierno español y el americano, cabe entender la exclamación espontánea de “¡Traición!”, emitida por los norteamericanos al enterarse de la voladura de su barco de guerra en plena noche en la bahía de La Habana. No obstante, el público no tardó en darse cuenta de que sería funesto lanzar acusaciones sin pruebas de que se hubiera cometido un delito. El acorazado pudo ser alcanzado por un torpedo, pero también cabe aducir causas accidentales, como la combustión espontánea del carbón de los pañoles, la descomposición de los explosivos rompedores instalados a bordo o la acción de un cable eléctrico cortocircuitado.»

LA QUININA EN LA INDIA. «Hubo un tiempo en que el gobierno indio importaba quinina por valor de 250.000 dólares anuales, y se quedaba corto. Tras muchos ensayos, la India consiguió cultivar el quino y actualmente en Bengala ya hay cuatro millones de árboles, vendiéndose en todas las oficinas de correos rurales paquetes de 300 miligramos del fármaco al precio de medio centavo, mientras que el gobierno saca de 2000 a 3500 dólares de beneficio al año.»

LA ARAÑA Y LA MOSCA. «Nuestra ilustración muestra una de las ilusiones más interesantes que se consiguen con espejos. El argumento que narra el prestidigitador es que una casa estuvo deshabitada tanto tiempo, que los escalones se hallan cubiertos por un gigantesca telaraña; los espectadores la ven asombrados acompañada de una araña con cabeza de mujer. El secreto del truco estriba en el espejo que se esconde sujeto a uno de los escalones formando un ángulo de 45 grados y que refleja los escalones inferiores. En el borde superior del espejo hay una entalla donde la mujer coloca la cabeza y su cuerpo se esconde tras el espejo. El cuerpo de la araña está sujeta a la red de hilos.»



Ilusión de la araña y la mosca

...ciento cincuenta años

¿CARBÓN EN EL POLO? «En su conferencia acerca del Sol, el profesor Nichol aludió al descubrimiento de campos carboníferos en las regiones polares de la Tierra. Este hecho revela sin ambages que esa parte de nuestro planeta estuvo alguna vez iluminada y caldeada por un agente más potente que ninguno de los que ahora le llegan, y que era capaz de mantener una vegetación de naturaleza tropical.»

SIN CEREBRO. «El cerebro puede separase, rebanarse hasta el cuerpo calloso, sin por ello destruir la vida. El animal vive y efectúa todas las funciones fisiológicas imprescindibles, aunque ahora carece de mente; no puede pensar ni sentir. Es necesario introducirle comida en su estómago, donde será digerida y el animal crecerá y engordará.»

BALLENEROS. «El Nantucket Enquirer da una imagen desalentadora de la situación de la actividad ballenera en el lugar. Desde 1843 han desaparecido quince veleros, por naufragios, ventas, etc. Se dice que la duración de los viajes es un tercio mayor que hace veinte años y el número de arribadas y salidas disminuye por días. El consumo de aceite de ballena decrece hace tiempo así como el abastecimiento. Otras sustancias carbónicas se usan ahora en aplicaciones que antaño estaban reservadas al aceite de pescado.»

COMPRESIBILIDAD. «Todos los cuerpos conocidos son capaces de disminuir de dimensiones mediante presión o percusión sin reducir su masa. Es esto una prueba convincente de que todos los cuerpos se componen de átomos, el espacio entre los cuales puede achicarse.»

VIENTO DE INVIERNO. «En Franconia (New Hampshire) reina un frío tan intenso, que, cuentan, los nativos se enjabonan la cara y salen corriendo a la calle, donde el viento les afeita la barba.»

Agregados metálicos y números mágicos

La investigación de trozos mínimos de metal puede conducirnos a la comprensión de las diferencias que median entre las propiedades de los átomos y las que caracterizan a los materiales sólidos

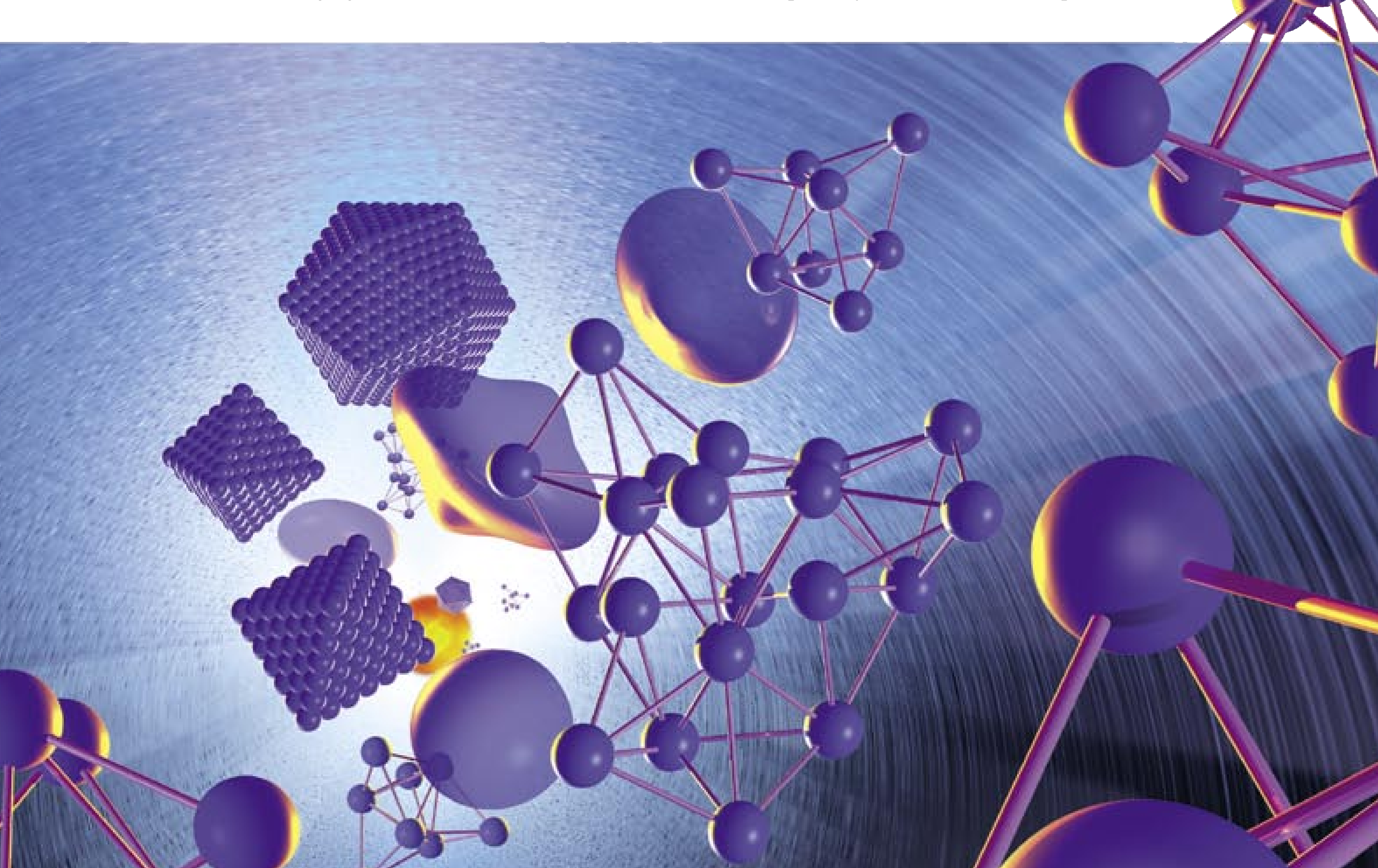
Matthias Brack

Calentemos un trozo de metal hasta que comience a evaporarse. Hagamos circular el vapor por una estrecha tobera capilar cuya apertura esté conectada a una cámara de vacío. ¿Qué ocurrirá? Pues que el vapor metálico se condensará en microagregados, que contendrán desde unos pocos átomos hasta varios miles de átomos del metal. Esos agregados metálicos, mucho más diminutos que una gota de agua o un grano de arena, constituyen un fascinante nuevo estado de la materia.

Si bien en la mayoría de los experimentos sobre agregados atómicos se trabaja con objetos diminutos, los agregados metálicos podrían, en principio, ser arbitrariamente grandes. Estos agregados constituyen, por tanto, el eslabón entre los átomos o moléculas y los sólidos o líquidos macroscópicos. En este sentido, se tiende un puente entre el microcosmos y el macrocosmos. Para un físico teórico, los agregados atómicos motivan una pléyade de preguntas intrigantes: ¿Por qué hay agregados más estables que otros? ¿Cuántos átomos debe contener el agregado para que sus propiedades empiecen a parecerse a las del material macroscópico? ¿De qué manera va cambiando la estructura del agregado con la aglomeración creciente de átomos?

Pero el interés por los agregados metálicos no se limita a los físicos teóricos. La industria química sabe por experiencia que los microagregados metálicos se comportan como catalizadores de excepcional calidad. Con todo, será difícil preparar estos catalizadores de manera controlada mientras no se conozcan suficientemente los principios que subyacen bajo la formación de los agregados.

Aspecto esencial de los agregados metálicos que los científi-



cos deben explicar es el de la razón de que prefieran aparecer en ciertos tamaños privilegiados. Los químicos se toparon con un problema similar hace más de 100 años, cuando inventaron la tabla periódica. Hallaron que algunos elementos presentan mayor estabilidad porque sus átomos contienen un número especial de electrones. A los elementos con 2, 10, 18, 36 y 54 electrones se les denominó “gases nobles” porque, al ser químicamente inertes, no interaccionaban con la larga serie de elementos de la tabla periódica. En el siglo presente se descubrió que los núcleos atómicos que contienen 2, 8, 20, 28, 50, 82 y 126 protones o neutrones son excepcionalmente estables. Tales números reciben el apelativo de “mágicos”. En este contexto, el núcleo de plomo, con sus 82 protones, será mágicamente estable. (De un isótopo de dicho elemento, con 126 neutrones, se dice que es doblemente mágico.)

También los agregados metálicos pueden ser mágicos. En 1984 un grupo de investigadores de la Universidad de Berkeley examinó agregados de sodio generados calentando el metal. Descubrió que los agregados formados por 8, 20, 40 o 58 átomos abundan más que el resto. Agregados con estos números particulares de átomos predominaban porque, por alguna razón, alcanzaban una estabilidad excepcional.

Los físicos se han dado cuenta de que los agregados poco estables formados a determinadas temperaturas evaporan los átomos sobrantes y se transforman presto en agregados menores y más estables. Los experimentalistas han descubierto que la lista de números mágicos correspondiente a agregados calientes de particular estabilidad continúa con los números 92, 138, 198, 264, 344, 442, 554 y sigue con números incluso mayores. Agregados de sodio (y de algunos otros metales) con estos números de átomos permanecen estables incluso cuando adquieren tal temperatura que no pueden solidificarse y permanecen como una gota líquida microscópica.

La tendencia a formar agregados con estos tamaños exactos arranca de las reglas impuestas por la mecánica cuántica, que obliga a que los electrones ligados puedan tener sólo ciertas energías. En los átomos aislados, los electrones que separan la cuantía de los que corresponden a los gases nobles están ligados muy débilmente y tienden a situarse lejos de los núcleos. Estos electrones de valencia, así se les llama, son los responsables de las propiedades químicas de los elementos.

En un microagregado metálico (o en una pieza mayor del metal) los electrones de valencia no permanecen ligados al átomo particular en el que originalmente residían. Antes bien, se mueven con entera libertad entre los átomos; se dice que están deslocalizados. Pese a todo, estos electrones permanecen dentro del agregado o en su entorno, pues se sienten atraídos por la carga positiva de los átomos que han abandonado. (Al quitar los electrones de valencia, los protones positivos de los núcleos no están ya compensados por un número igual de electrones, y el átomo, antes neutro, se transforma en un ion dotado de carga positiva.)

Para entender por qué ciertos números de átomos confieren estabilidad a un agregado, a los físicos les gustaría determinar la configuración detallada de todos sus iones y electrones de valencia, tarea harto difícil para llevarla a cabo. Sin embargo, pueden obtenerse resultados para un agregado metálico modelándolo como una “gelatina” de carga positiva que atrae a los electrones de valencia (una simplificación que en la jerga se conoce por modelo de gelatina).

De acuerdo con las reglas de la mecánica cuántica, las energías de estos electrones deben estar cuantizadas, es decir, los niveles de energía tienen valores dados y nunca ocurren para valores intermedios entre éstos. En un agregado, lo mismo que en un átomo, los niveles de energía disponibles para los electrones no están igualmente espaciados, sino que forman agrupaciones de niveles cercanos, separadas por intervalos de energía mayores. Por razones históricas, estas agrupaciones de niveles de energía en los átomos se denominan capas electrónicas, aunque los electrones no están realmente confinados en regiones del espacio con el aspecto de una capa. Las reglas de la mecánica cuántica limitan el número de electrones que pueden residir en cada capa. Si los electrones llenan totalmente una o más capas en un átomo, éste no reacciona con otros átomos y se torna estable. Por tanto, podemos dar cierto sentido a la existencia de números mágicos en agregados metálicos: éstos corresponden al número de electrones de valencia que ocupen por completo una o varias capas de un agregado, dotándolo de singular estabilidad. (El mismo mecanismo opera para capas llenas de protones y neutrones en los núcleos de los átomos y explica sus números mágicos.)

Los agregados metálicos que muestran mayor estabilidad ofrecen una morfología casi esférica. Por contra, si los electrones disponibles no son suficientes para llenar del todo la capa de energías más alta, el agregado puede aplanarse o alargarse, adquiriendo entonces la forma de una torta o la de un balón de rugby, respectivamente. Puede adquirir formas más complicadas: la de una pera, un limón, un rombo o incluso una configuración sin ninguna simetría particular. Tales formas reducen la energía total del agregado, haciéndolo más estable, aunque no tanto como los agregados cuyas capas electrónicas están plenamente ocupadas. Desde hace mucho tiempo se sabe que muchos núcleos atómicos estables también poseen un aspecto deformado. Por eso, algunas de las herramientas teóricas para describir los agregados deformados provienen del trabajo desarrollado antes en física nuclear.

El formalismo de la mecánica cuántica explica perfectamente las capas electrónicas de los agregados y sus correspondientes números mágicos. Pero a muchos no especialistas esta explicación no les satisface, porque las reglas de la mecánica cuántica a veces parece que contradicen la intuición y no es fácil encontrarles una representación plástica. Podemos,

1. LOS EXPERIMENTOS con haces atómicos envían partículas diminutas de un metal desde una fuente caliente a través de una larga cámara de vacío. En razón de las condiciones experimentales impuestas, los agregados metálicos así generados pueden ser pequeñas moléculas con rígidos enlaces que mantienen juntos a los átomos, grandes agrupaciones de átomos empaquetados en poliedros regulares o gotas gelatinosas carentes de estructura. Abundan los ejemplos especialmente estables de cada una de estas tres variedades, aunque no en el transcurso de un mismo experimento.

MATTHIAS BRACK enseña, desde 1978, física teórica en la Universidad de Ratisbona. Ha desarrollado su actividad investigadora en el Instituto Niels Bohr, la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook y el Instituto Laue Langevin de Grenoble.

sin embargo, alcanzar cierto grado de comprensión de los números mágicos usando formulaciones clásicas que se corresponden mejor con nuestra experiencia diaria en el contacto con objetos macroscópicos.

Esta vía utiliza la teoría de las órbitas periódicas, desarrollada a comienzos de los setenta para servir de puente entre la mecánica cuántica y la mecánica clásica. La teoría de órbitas periódicas permite determinar las energías de las capas principales en un sistema que contiene electrones u otras partículas pequeñas.

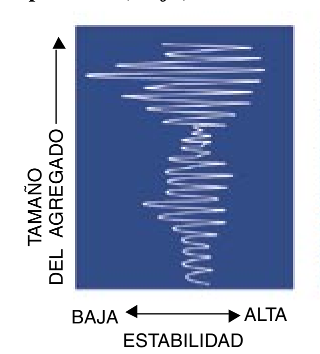
Para ofrecer una presentación visual de la aplicación de la teoría de órbitas periódicas a los agregados, imaginemos que un agregado metálico grande no es más que una esfera hueca que contiene electrones de valencia que se mueven con velocidad constante siguiendo caminos rectilíneos. Estos electrones rebotan en la superficie interna de la esfera; lo hacen de forma tal, que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, una propiedad general que es válida para partículas que rebotan en la pared y para ondas luminosas reflejadas por un espejo. Este burdo modelo funciona bien porque los electrones de valencia, aunque esencialmente libres en el agregado, no pueden abandonarlo.

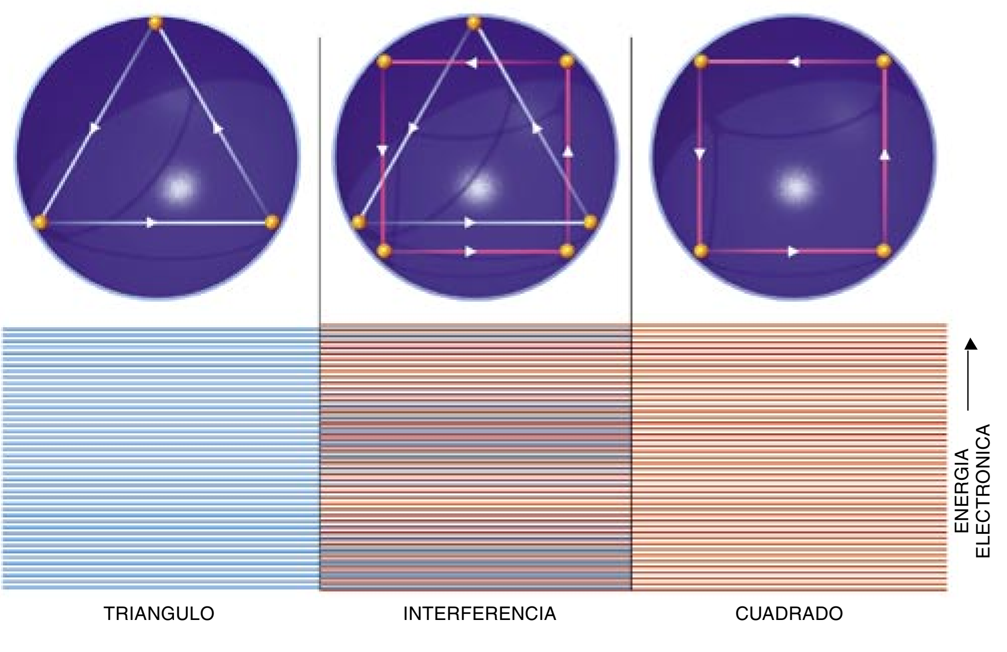
En una cavidad esférica, las órbitas periódicas son las trayectorias que pueden tomar las partículas: éstas se mueven hacia adelante y hacia atrás a lo largo de un diámetro o bien siguen caminos poligonales con tres o más vértices. Los físicos pueden deducir la distribución aproximada de niveles de energía disponibles atendiendo sólo a las órbitas periódicas que tienen caminos más cortos y ocurren con mayor frecuencia. Las tres órbitas más cortas son los diámetros, triángulos y cuadrados; por razones sutiles que tienen que ver con la geometría, los diámetros ocurren de manera poco frecuente.

Ciñéndonos a triángulos y cuadrados, el cálculo produce un patrón de capas de energía que es, en cierto sentido, periódico: representados en función de la energía, los niveles permitidos aparecen a intervalos regulares. Pero la repetición no ocurre con una única “frecuencia”. Antes bien, existen dos frecuencias diferentes, correspondientes a las dos órbitas dominantes (los triángulos y los cuadrados). Y de la misma manera que dos ondas sonoras de frecuencia parecida al superponerse interfieren una con la otra para producir pulsos de frecuencia menor, los dos patrones de capas también interfieren entre sí para producir un apiñamiento de niveles de energía a gran escala, que se conoce como supercapas.

En principio, las supercapas también deberían ocurrir en los núcleos atómicos. No aparecen, sin embargo, porque los núcleos no son nunca lo suficientemente grandes para acomodarlas: se necesitan unas 800 o 1000 partículas para que aparezca la primera supercapa, mientras que los mayores núcleos que se han sintetizado hasta el presente tienen menos de 200 neutrones y 120 protones. Sí se han detectado supercapas en agregados metálicos grandes. En 1991, en el Instituto Niels Bohr de Copenhague y el Instituto Max Planck para la Investigación del Estado Sólido en Stuttgart, se observaron supercapas en agregados de sodio calientes. Inmediatamente después, el Laboratorio Aimé Cotton, en Orsay, encontró pruebas de supercapas en agregados de litio y la Universidad de Lyon I detectó supercapas en agregados de galio.

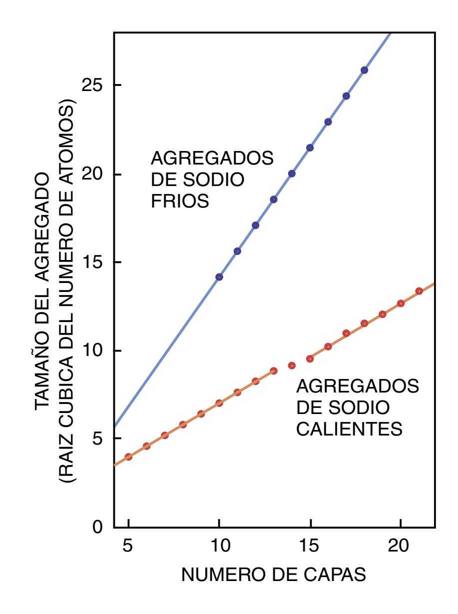
La teoría de órbitas periódicas para el modelo de la cavidad esférica predice que la raíz cúbica de un número mágico, que se corresponde aproximadamente con el radio del agregado pertinente, debería aumentar en la misma cuantía al pasar de una capa a la siguiente. Cuando los investigadores representan en una gráfica la raíz cúbica de los números mágicos (observados para distintos agregados metálicos calientes) en función del número de orden de la capa, obtienen una línea recta con una pendiente de 0,61. Este resultado está de acuerdo con la teoría de órbitas periódicas para la cavidad esférica (que pre-





2. MODELO SENCILLO de agregados metálicos que los considera esferas huecas con los electrones que se mueven por su interior y rebotan contra la pared (*derecha*). Apoyados en la teoría de las órbitas periódicas, los físicos calculan las energías aproximadas de los niveles electrónicos (*barras horizontales*). Los dos tipos más importantes de trayectorias periódicas (*triángulos y cuadrados*) se interfieren para dar lugar a apiñamientos de capas, denominados supercapas. El patrón de las supercapas se aprecia en los experimentos y en modelos teóricos un tanto complicados (*abajo*).

3. EL TAMAÑO del agregado, medido por la raíz cúbica de un número de átomos, siempre crece al aumentar el número de capas. Pero la tasa de aumento (pendiente) depende de la temperatura del haz de agregados. Los agregados de sodio fríos están constituidos por capas icosaédricas de átomos empaquetados muy compactos, una geometría que da lugar a una pendiente característica de aproximadamente 1,5. Por contra, la forma de los agregados de sodio calientes está controlada por las capas electrónicas, que producen una pendiente de alrededor de 0,6. (La discontinuidad que se observa para la capa 14 débese a efectos de supercapa y se explica perfectamente con la teoría de órbitas periódicas.)



dice una pendiente de 0,603) con un error inferior al 1 por ciento. El cálculo desarrollado de acuerdo con las reglas de la mecánica cuántica y el modelo de gelatina, que se puede llevar a cabo para agregados que contengan unos pocos miles de átomos, reproduce exactamente la pendiente observada (cálculos para agregados mayores necesitarían un enorme esfuerzo computacional).

Para Platón los componentes fundamentales de la materia eran poliedros regulares, que en su honor se denominan sólidos platónicos. Quizá no andaba muy lejos el filósofo griego para el caso de agregados metálicos fríos. Cuando los átomos metálicos (en una cifra que ronda o supera el millar) se aglomeran lentamente a temperaturas bastante bajas, forman sólidos diminutos; en éstos los átomos se empaquetan de manera compacta para dar lugar a formas geométricas regulares.

Los físicos cuentan con las herramientas necesarias para inferir la configuración geométrica de estos agregados metálicos fríos observando el modo en que su estabilidad depende del tamaño del agregado. En 1991 expertos del Instituto Max Planck para la Investigación del Estado Sólido provocaron la aglomeración de átomos de sodio a bajas temperaturas y encontraron que los agregados más estables correspondían a tamaños completamente diferentes de los que acontecían a temperaturas altas. Es decir, aparecían números mágicos nuevos. Los físicos no tardaron en llegar a la conclusión de que los nuevos números mágicos que habían observado correspondían a agrupaciones de átomos empaquetados en la forma de icosaedros perfectos, que son sólidos con 20 caras triangulares.

En esos experimentos aparece una secuencia de números mágicos conforme van creándose icosaedros cada vez mayores por la adición de cáscaras de sodio cuya anchura es de un átomo. Estas "capas atómicas" nos recuerdan los catafilos de cebolla. Los agrupamientos en cuestión, con formas poliédricas sencillas, son más estables que los apilamientos irregulares; en efecto, la energía que se requiere para mantener los átomos en su lugar es menor conforme se restringe el número de aristas. Diríase que la naturaleza se alegra con la economía que se alcanza con los poliedros perfectos.

Los números mágicos de los agregados metálicos fríos (o más correctamente su raíz cúbica) aumentan con el número de capas atómicas, pero su tasa de crecimiento no es la misma que la tasa de los números mágicos de agregados metálicos calientes con respecto al número de capas de energía electrónicas. Se puede decir incluso más: la tasa de crecimiento (pendiente de la recta) varía en cada tipo de agregados fríos. Parece que las diferentes pendientes señalan la existencia de distintas formas poliédricas. Por ejemplo, la pendiente para los agregados fríos de sodio o calcio es alrededor de 1,5 y éstos crean seguramente icosaedros. Pero los agregados que contienen átomos de sodio y de yodo a partes iguales, los mismos de sodio que de cloro, dan lugar a una pendiente exactamente igual a 1,0, indicio de que dibujan cubos. La razón de que ocurran unas formas en vez de otras permanece envuelta en el misterio.

Los agregados fríos de aluminio o de indio plantean un interrogante sugestivo. Al tender la gráfica de la raíz cúbica de sus números mágicos en función del número de orden de la capa, los investigadores han encontrado una pendiente de 0,220, que es menor que el valor para capas electrónicas estables (0,6) y diferente de las pendientes para átomos empaquetados en tetraedros (0,550), octaedros (0,874), icosaedros (1,493) o cubos (1,0). De hecho, no es posible encontrar un poliedro regular que, al ser recubierto por capas sucesivas de átomos, engendre los números mágicos observados para estos agregados.

El grupo de Stuttgart ha propuesto una hipótesis verosímil, en cuyo marco tales agregados de aluminio o de indio se desarrollarían en octaedros, si bien en el proceso de pasar de un número mágico al siguiente sólo se añadirían cada vez los átomos suficientes para cubrir una cara triangular. Este comportamiento llevaría a una pendiente menor, que es justo lo que se observa. Esta explicación, aunque plausible, plantea de inmediato una cuestión que espera respuesta: ¿por qué los octaedros completos no son mucho más estables que los configurados con sólo una o dos caras triangulares añadidas?

Interesa destacar que los números mágicos asociados al empaquetamiento atómico no determinan de manera unívoca la forma de los correspondientes poliedros. Por ejemplo, los números mágicos asociados con icosaedros coinciden con los números mágicos que se obtendrían para cubo-octaedros (cubos achatados a los que se les ha rebanado los vértices). Del estudio cuidadoso de agregados de calcio fríos los expertos deducen que se forman icosaedros. Sin embargo, no podemos estar seguros del todo, pues nadie ha visto los icosaedros directamente. En principio, los agregados mayores podrían analizarse con un microscopio electrónico si permaneciesen quietos. El problema estriba en que los agregados libres se forman en haces de átomos que se mueven a gran velocidad y no se los puede parar para fotografiarlos sin condicionar su morfología.

En los agregados metálicos constituidos por un número alto de átomos, los dos tipos de capas (capas electrónicas y capas atómicas que configuran poliedros perfectos) compiten por el control sobre la forma y la estabilidad del agregado. El tamaño y la

temperatura son ingredientes críticos para determinar qué tipo de capa predomina. Pero la medida de la temperatura de agregados libres que viajan en un haz atómico es muy difícil; puede uno preguntarse si es posible incluso el definir una temperatura. En estricta puridad, la temperatura tiene sentido sólo para sistemas con muchas partículas en equilibrio termodinámico. Pero esta condición no se da en muchos experimentos con agregados. Antes bien, cada agregado formado en el haz sigue su propio camino, sin verse afectado por sus vecinos. Tales agregados aislados no alcanzan el equilibrio termodinámico. Por tanto, a menos que pongamos un termómetro en contacto con el microagregado que queremos estudiar, lo que es evidentemente imposible en los experimentos, no hay modo de determinar su temperatura.

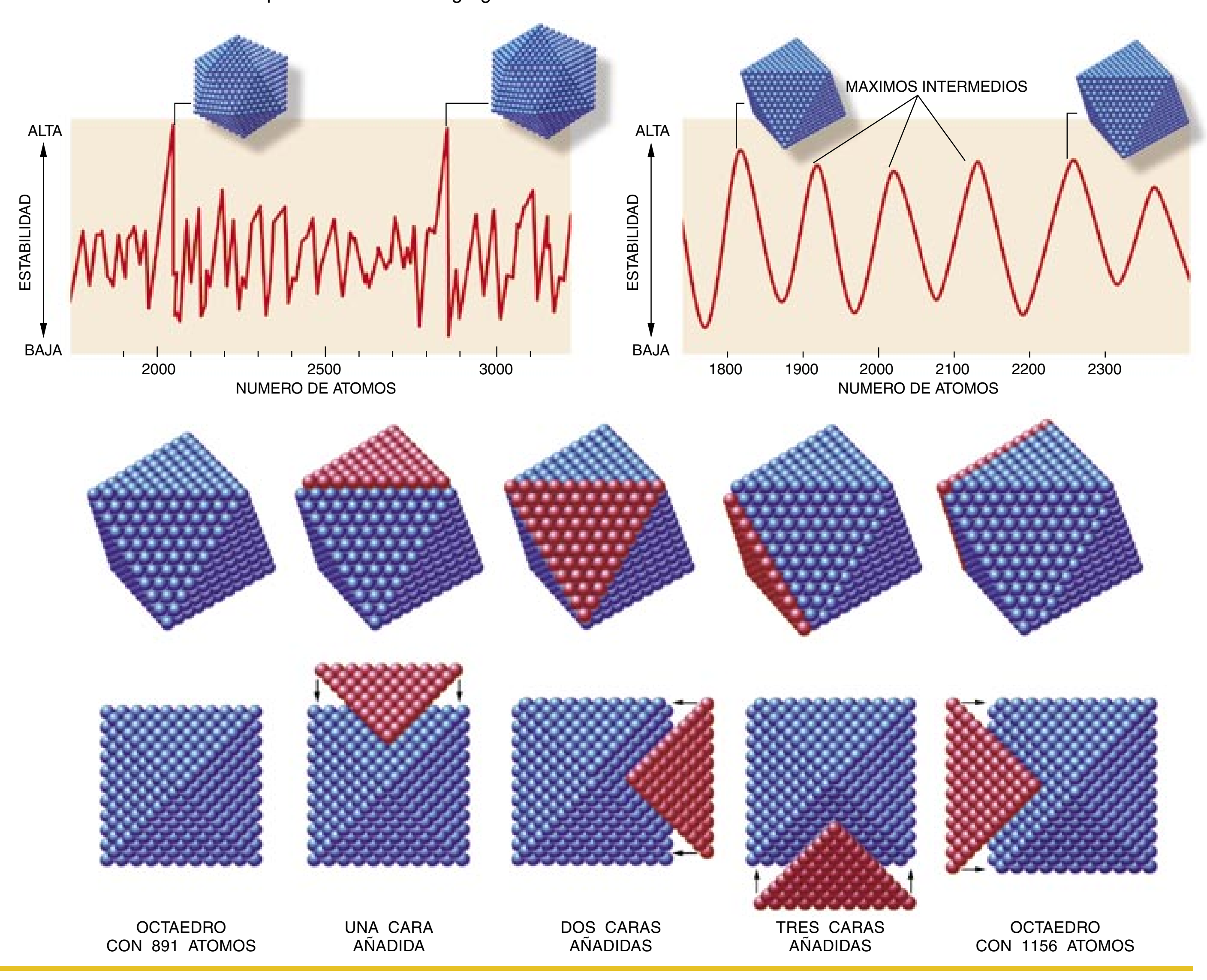
En cualquier caso, las tendencias están claras. Al calentar la tobera de la fuente bajo condiciones controladas con sumo cuidado, las capas icosaédricas pulcramente empaquetadas de los agregados de sodio fríos se esfuman. A buen seguro, esta transición corresponde a la fusión de los agregados sólidos. En cuyo caso la temperatura de fusión depende del tamaño del agregado.

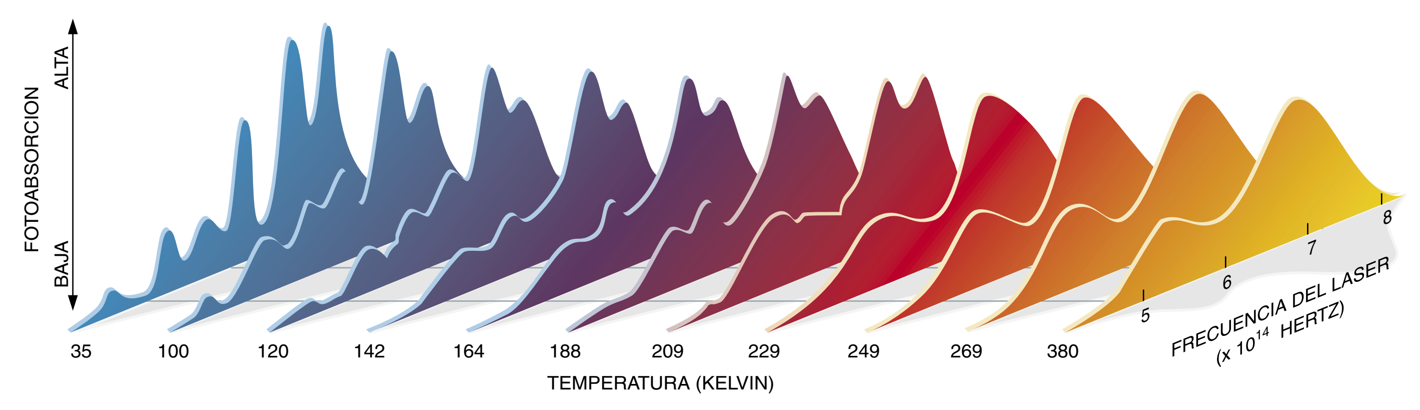
Los expertos han encontrado una transición similar en agregados de aluminio. Cuando la temperatura de la fuente supera los 500 grados Kelvin, una temperatura todavía bastante más

Empaquetamiento en frío

Para explicar la excepcional estabilidad de agregados metálicos fríos se recurre a la geometría. Los agregados fríos de sodio alcanzan una reseñable estabilidad cuando sus átomos se empaquetan y dibujan un icosaedro, un sólido con 20 caras. Por ello las gráficas de la estabilidad en función del tamaño del agregado muestran picos resaltados cuando el número de átomos disponible es tal que forman icosaedros perfectos (*izquierda*).

Más difíciles de explicar resultan los agregados fríos de átomos de aluminio, que se empaquetan formando octaedros. Su estabilidad es alta cuando los átomos se empaquetan en octaedros perfectos (*derecha*), pero también ocurren máximos para tamaños intermedios. La razón pudiera ser que el recubrimiento de caras individuales del octaedro dé lugar a un aumento de estabilidad (*caras en rojo, abajo*). Ya que al añadir una cuarta cara se completa el siguiente octaedro perfecto, sólo se espera que ocurran tres máximos de estabilidad intermedios. —*M. B.*





4. EL ESPECTRO DE FOTOABSORCION de luz láser muestra que los agregados cambian: pasan de ser moléculas rígidas a ser masas sin estructura conforme aumenta la temperatura. La probabilidad de absorber fotones varía con la frecuencia del láser, una característica de las moléculas, para agregados de sodio mantenidos a temperaturas bajas (*tonos azules*). Pero a temperaturas altas (*tonos naranja*), el espectro se suaviza para mostrar dos anchas jorobas.

baja que la temperatura de fusión de un trozo de aluminio sólido, las gráficas de la raíz cúbica del tamaño de agregados mágicos en función del número de capas dejan de exhibir una pendiente de 0,220. Por contra, muestran una pendiente que se aproxima a 0,6, que es el valor típico de las capas electrónicas. Parece razonable admitir que estos agregados se han fundido, aun cuando la temperatura de la tobera se halla bastante por debajo del punto de fusión del metal sólido. Pero esta conclusión podría ser simplista en exceso: lo mismo que con la temperatura, la idea de transición de fase entre un sólido y un líquido se torna problemática para objetos de este tamaño. Quizá los agregados experimentan una fusión localizada de su superficie, lo que bastaría para destruir la estructura controlada por el empaquetamiento de los iones, permitiendo entonces que dominase la estabilidad otorgada por las capas electrónicas completas.

En la Universidad de Friburgo se acaba de observar una transición algo distinta, aunque afín. Para controlar mejor la temperatura de pequeños agregados de sodio los físicos recurrieron a un truco ingenioso: prepararon los agregados inmersos en helio gaseoso, cuya temperatura puede ajustarse con exquisita precisión. En esta mezcla se dan muchas colisiones entre los átomos de helio y los agregados de sodio. Pero ya que el helio es un gas noble (es decir, permanece químicamente inactivo), no modifica la estructura de los agregados, al menos a temperaturas moderadas. Por tanto, el helio proporciona un medio en el cual puede establecerse de forma natural el equilibrio termodinámico.

En este caso los investigadores no estudiaron los números mágicos, sino la manera en que los agregados de sodio de un tamaño fijo absorben la luz de un láser. La probabilidad de absorber luz es una función de la frecuencia del láser (su espectro de absorción) que aporta cuantiosa información sobre la naturaleza de los cuerpos iluminados. En particular, los espectros de moléculas frías y rígidas difieren de los correspondientes a gotas líquidas y calientes. A temperaturas inferiores a 100 °K, los físicos observaron un espectro con muchos picos bien marcados, típico de una molécula rígida, mientras que a temperaturas por encima de 380 °K encontraron un espectro con dos anchas jorobas, en las posiciones que los cálculos predicen para el modelo de gelatina carente de estructura.

Para agregados muy pequeños, en los que importa siempre la estructura interna, son factibles los cálculos mecanocuánticos rigurosos que toman en consideración todos los electrones de cada átomo. Estos dilucidan la estructura molecular detallada de los agregados y pueden dar una descripción muy precisa de su estabilidad. Para agregados mayores, con unos cientos de átomos o más, los cálculos requieren tal cantidad de tiempo de cálculo en potentes computadoras, que los físicos deben acudir al modelo de la gelatina. Para agregados con muchos miles de átomos, los investigadores se ven forzados a dejar de lado la mecánica cuántica y recurrir a la teoría de órbitas periódicas o confiar en la información indirecta obtenida a partir de los números mágicos experimentales.

La ciencia ha recorrido un largo camino desde 1984 en su empeño por comprender y extender las listas de números mágicos en agregados metálicos. En algunos experimentos se han generado agregados icosaédricos que alojan hasta 21.000 átomos de sodio. Sin embargo, está claro que un trozo macroscópico de sodio no contiene tales icosaedros. De hecho ningún cristal macroscópico puede formarse empaquetando esos icosaedros: de la misma forma que no se puede recubrir por completo un suelo plano con baldosas pentagonales, los icosaedros no poseen la simetría necesaria para crear cristales extensos en tres dimensiones llenando el espacio por entero. Así pues, incluso los mayores agregados de sodio producidos hasta la fecha organizan sus átomos de una manera muy distinta de lo que sucede en un trozo macroscópico de sodio.

Parte de la motivación inicial para el estudio de los agregados atómicos fue el determinar cuántos átomos se necesitan para que una porción diminuta del material alcanzara las propiedades del sólido macroscópico. Los físicos han aprendido mucho sobre los agregados metálicos y sobre los números mágicos que les proporcionan estabilidad. Pero todavía no conocemos la respuesta a la cuestión fundamental, la de cuándo y cómo ocurre la transición al sólido extenso.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE PHYSICS OF METAL CLUSTERS. M. L. Cohen y W. D. Knight en *Physics Today*, vol. 43, n.º 12, págs. 42-50; diciembre 1990.

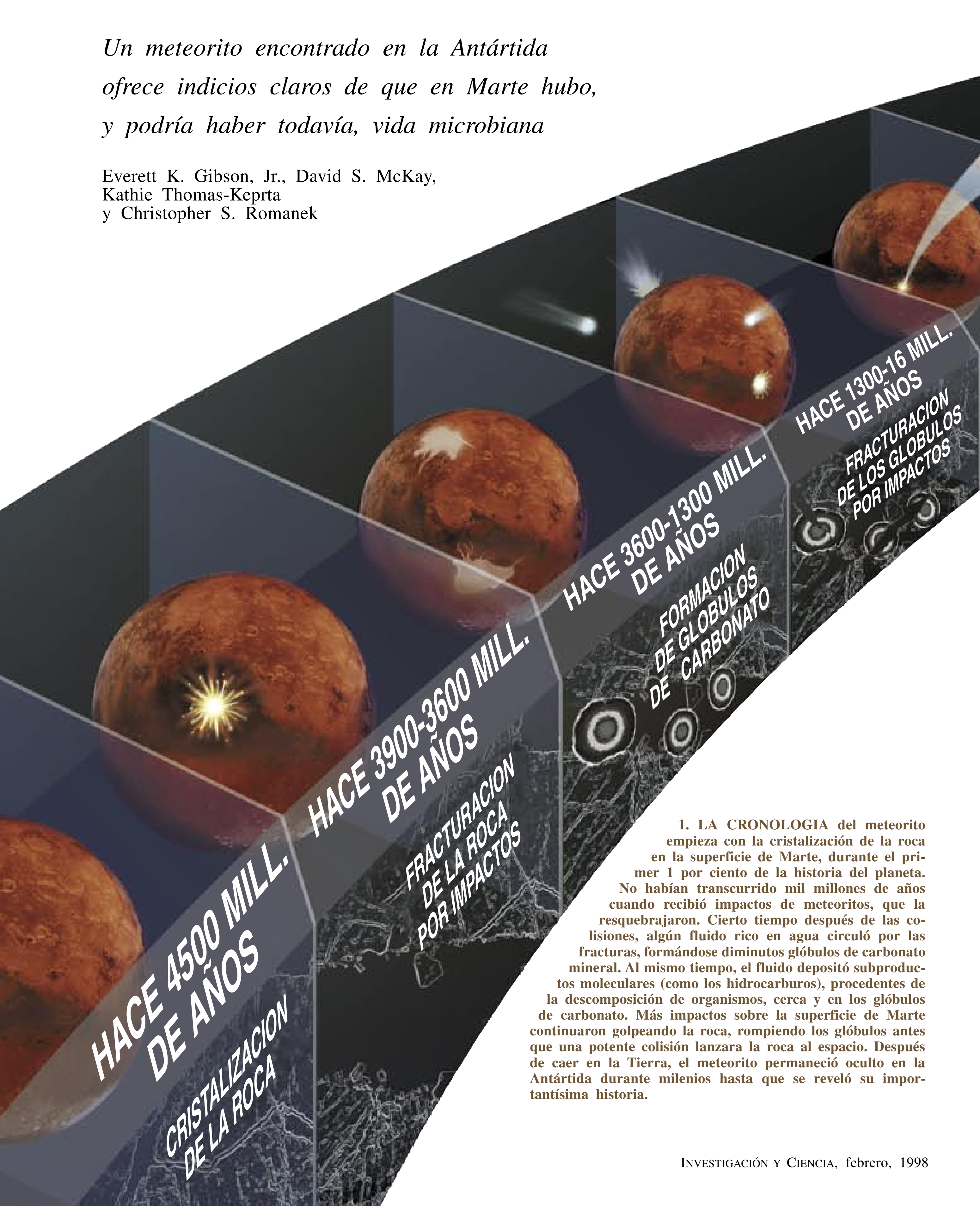
THE PHYSICS OF SIMPLE METAL CLUSTERS: EXPERIMENTAL ASPECTS AND SIMPLE MODELS. Walt A. de Heer, págs. 611-676; SELF-CONSISTENT JELLIUM MODEL AND SEMICLASSICAL APPROACHES. Matthias Brack, págs. 677-732, en *Reviews of Modern Physics*, vol. 65, 1993.

SHELLS OF ATOMS. T. P. Martin en *Physics Reports*, vol. 273, n.º 4, págs. 199-242; agosto 1996.

¿Hay vida en Marte?

Un meteorito encontrado en la Antártida ofrece indicios claros de que en Marte hubo, y podría haber todavía, vida microbiana

Everett K. Gibson, Jr., David S. McKay, Kathie Thomas-Keprta y Christopher S. Romanek



1. LA CRONOLOGIA del meteorito empieza con la cristalización de la roca en la superficie de Marte, durante el primer 1 por ciento de la historia del planeta. No habían transcurrido mil millones de años cuando recibió impactos de meteoritos, que la resquebrajaron. Cierto tiempo después de las colisiones, algún fluido rico en agua circuló por las fracturas, formándose diminutos glóbulos de carbonato mineral. Al mismo tiempo, el fluido depositó subproductos moleculares (como los hidrocarburos), procedentes de la descomposición de organismos, cerca y en los glóbulos de carbonato. Más impactos sobre la superficie de Marte continuaron golpeando la roca, rompiendo los glóbulos antes que una potente colisión lanzara la roca al espacio. Después de caer en la Tierra, el meteorito permaneció oculto en la Antártida durante milenios hasta que se reveló su importantísima historia.



De los temas científicos con atractivo popular pocos han calado tan hondo como la idea de la existencia de vida en Marte. Desde casi la invención del telescopio, a lo largo de los tres últimos siglos el tema ha inspirado innumerables estudios, de corte científico unos y más especulativos otros. Todos comparten, sin embargo, un mismo convencimiento: si, además de la Tierra, otro planeta del sistema solar albergara vida, ése sería Marte.

El interés por la presencia de vida en Marte se aviva a cada nuevo descubrimiento concerniente al misterioso planeta rojo. Tales hallazgos suelen coincidir con las aproximaciones periódicas entre los dos planetas. Cada quince años Marte se acerca a unos 56 millones de kilómetros de la Tierra (el próximo acercamiento se espera para el verano del 2003). Creíase que la vida en Marte era tan o más inteligente y compleja que la del *Homo sapiens*; con menos razón aún se pintaba a los supuestos marcianos verdes y de tamaño chico.

Durante uno de los acercamientos, a finales del siglo XIX, Giovanni V. Schiaparelli anunció que había observado grandes líneas que atravesaban la superficie del planeta; el astrónomo italiano las llamó *canali*. A principios de este siglo, Percival Lowell insistía en que esas estructuras eran canales construidos por una civilización avanzada. Sin embargo, en los años sesenta y setenta, el envío de las primeras sondas espaciales a Marte por los Estados Unidos y la Unión Soviética trajo el abandono de las teorías acerca de las líneas y las civilizaciones marcianas. Las sondas mostraron que no se trataba de canales, sino de largos y profundos cañones. Tras un decenio de observación, las sondas no encontraron indicios de vida, y mucho menos de vida inteligente y civilizada.

Pero entonces emergió otra polémica, la relativa a la posibilidad de algún tipo de vida microbiana, especialmente hace miles de millones de años, cuando el planeta era más cálido y húmedo. En agosto de 1996 el asunto saltó a la palestra. Con varios de nuestros compañeros del centro espacial Johnson de la NASA y de la Universidad de Stanford, dimos a conocer las insólitas características de un meteorito, procedente de Marte. Tales rasgos podían interpretarse como vestigios de antigua vida bacteriana. El meteorito, de 1,9 kilogramos del peso y tamaño de una patata, llamado ALH84001, se había encontrado en la Antártida en 1984.

Nuestra tesis no convenció a todos. Algunos adujeron que las peculiaridades del meteorito encajaban mejor en el marco de una explicación no biológica. Nosotros creemos, por contra, que los hechos y los razonamientos que exponemos en este artículo prueban con solidez la existencia de una forma primitiva de vida. Más aún, esas formas de vida podrían todavía darse en Marte si, como han teorizado algunos, los espacios porosos y las grietas de las rocas bajo la superficie del planeta contienen agua líquida.

¿Qué interés reviste para la ciencia la existencia, hace miles de millones de años, de vida elemental en el planeta rojo? Sin la menor duda, la dispersión de la vida por el universo ha constituido y sigue siendo una de las cuestiones científicas más profundas que están sin resolver. Pero carecemos de base contrastable que permita lucubrar con rigor. La confirmación de que alguna vez se diera vida primitiva en Marte resultaría sumamente provechosa para conocer el abanico de condiciones

1984



EL METEORITO HALLADO EN LA ANTARTIDA

1993



MUESTRA LLAMADA ALH84001 PROCEDENTE DE MARTE

1996





2. LA ROCA MARCIANA, conocida como ALH84001, aparece a tamaño real (*arriba*). El meteorito se compone básicamente de ortopiroxina, un silicato mineral. Se procedió a una sección transversal de la roca para dejar expuesto su interior (*centro*). El fluido circuló por la grieta central, ligeramente desviada a la derecha, y depositó glóbulos de carbonatos minerales. Un trocito de meteorito de 2 milímetros de largo (*abajo a la izquierda*) contiene algunos glóbulos de unos 200 micrometros de ancho. La concentración de componentes orgánicos (hidrocarburos aromáticos policíclicos) es mayor en los glóbulos de carbonato o a su alrededor. El hallazgo sugiere que el fluido que circulaba por la fractura contenía productos de descomposición de organismos que quedaron retenidos en los glóbulos en formación.

necesarias para que un planeta genere la química compleja de la que parte la vida. Nos ayudaría, además, a comprender el origen de la vida en la Tierra. Por último, estaríamos preparados para dilucidar las hipótesis (hoy meras conjeturas) sobre la extensión de la vida en el cosmos.

La situación actual de Marte no admite la presencia de vida. Su atmósfera se compone en un 95 por ciento de dióxido de carbono, en un 2,7 por ciento de nitrógeno, en un 1,6 por ciento de argón; sólo encierra cantidades traza de oxígeno y vapor de agua. La presión en superficie no llega al 1 por ciento de la experimentada en la Tierra. Las temperaturas, incluso durante los veranos de las regiones más cálidas, rara vez exceden los cero grados Celsius. Y lo que encierra mayor importancia, parece que la superficie del planeta carece de agua líquida, uno de los requisitos fundamentales para que prenda la vida.

Ante esta realidad no debería sorprender que las dos sondas Viking que tomaron la superficie del planeta rojo en julio y septiembre de 1976 fracasaran en su intento de encontrar algún indicio de vida. Los resultados pusieron en duda, sin descartarla del todo, la posibilidad de que hubiera vida en Marte. Las sondas,

equipadas para detectar componentes orgánicos con niveles de sensibilidad de una parte por mil millones, no detectó ninguno, ni en la superficie ni centímetros suelo abajo. Otros aparatos tampoco hallaron pruebas de organismos microbianos. Al final, se llegó a la conclusión de que la posibilidad de que hubiera vida en Marte era muy pequeña y que, para elaborar un estado de la cuestión definitivo, era preciso esperar futuros lanzamientos de sondas que aportaran nuevos análisis y muestras para su estudio exhaustivo a su regreso a la Tierra.

Aunque las sondas no encontraron señales de que en la actualidad exista vida en Marte, las fotografías tomadas por el Viking y las anteriores obtenidas por la sonda Mariner 9, sugieren que, hace unos miles de millones de años y quizás, hasta hace sólo unos cientos de millones de años, grandes volúmenes de agua esculpieron la superficie del planeta.

A ello hemos de añadir que varios meteoritos procedentes de Marte, incluido ALH84001, ofrecen pruebas tangibles de un pasado húmedo; portan signos inequívocos de alteración por acción del agua. Algunos de estos meteoritos contienen carbonatos, sulfatos, hidratos y arcillas que sólo pueden formarse cuando el agua entra en contacto con los otros minerales de la roca.

Nuestra tesis depende en última instancia de que ALH84001 proceda del planeta rojo. Pero sobre eso no hay dudas. Se trata de uno de los meteoritos que se han venido encontrando, desde mediados de los setenta, en la Antártida, rica en meteoritos. A comienzos de los ochenta, Donald D. Bogard y Pratt Johnson, del centro espacial Johnson de la NASA, iniciaron el estudio de un grupo de meteoritos que contenían pequeñas burbujas de gas atrapadas en el vidrio del interior de la roca. Se cree que el vidrio se formó durante los impactos de meteoroides o cometas sobre la roca, cuando ésta se hallaba en la superficie de Marte. Algunos impactos transmitieron energía suficiente para enviar fragmentos al espacio, donde los capturaría el campo gravitatorio de la Tierra. Este es el modelo de explicación aceptado por los expertos en planetología para justificar la presencia de piedras de Marte en nuestro suelo.

Bogard y Johnson hallaron que las diminutas muestras de gas atrapado en el vidrio de algunos meteoritos tenían las mismas composiciones químicas e isotópicas de los gases de la atmósfera de Marte (medidas en 1976 por las sondas Viking). La correlación de uno a uno entre las dos muestras de gases (en un rango de nueve órdenes de magnitud) respalda de modo contundente la procedencia marciana de los meteoritos. Cinco de ellos contenían muestras de atmósfera de Marte. No ocurría lo mismo con ALH84001 que, sin embargo, por sus características, distribución de isótopos de oxígeno y mineralogía, se sitúa en el mismo grupo de las otras cinco rocas de Marte.

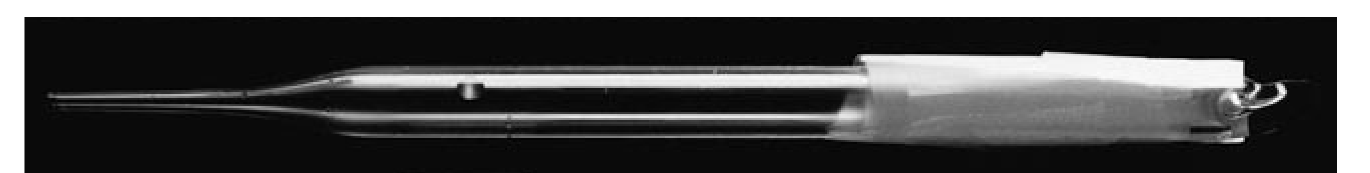
La distribución de los isótopos de oxígeno en el interior de un grupo de meteoritos se ha convertido en la prueba más sólida del origen marciano de las rocas, incluida ALH84001. A principios de los setenta, el equipo encabezado por Robert N. Clayton, de la Universidad de Chicago, ponía de manifiesto que la distribución de los isótopos de oxígeno 16, oxígeno 17 y oxígeno 18 en los silicatos de algunos de los meteoritos ofrecía concentraciones relativas únicas.

Era un descubrimiento valioso. Demostraba que los cuerpos de nuestro sistema solar formados en distintas regiones de la nebulosa tenían composiciones únicas de isótopos de oxígeno. A partir de la utilización de la "huella dactilar" isotópica, Clayton ayudó a identificar las estrechas relaciones existentes entre un grupo de 12 meteoritos; entre ellos, ALH84001. La combinación de los gases atmosféricos atrapados y la específica distribución de los isótopos de oxígeno han permitido llegar a la conclusión de que estos meteoritos proceden de Marte.

EVERETT K. GIBSON, Jr., DAVID S. McKAY, KATHIE THOMAS-KEPRTA y CHRISTOPHER S. ROMANEK formaban parte del equipo que dio a conocer las pruebas de actividad biológica en el meteorito ALH84001. Gibson, McKay y Thomas-Keprta trabajan en el centro espacial Johnson de la NASA en Houston; Romanek, especialista en geoquímica a baja temperatura y espectrometría de masa de isótopos estables, se halla adscrito al departamento de geología de la Universidad de Georgia, labor que comparte con su dedicación al laboratorio de ecología "Río Savannah" de la misma institución. Gibson, geoquímico, es especialista en meteoritos; McKay, en regolitos planetarios. Thomas-Keprta, biólogo, aplica la microscopía electrónica en el estudio de meteoritos, partículas de polvo interplanetario y muestras lunares.

Mediante otros análisis, principalmente de isótopos radiactivos, se ha logrado hilvanar la historia de ALH84001 desde sus orígenes en el planeta rojo hasta la actualidad. Los períodos clave son: edad de la roca (el tiempo transcurrido desde su cristalización en Marte), tiempo durante el cual el meteorito viajó por el espacio y tiempo que lleva en la Tierra. Los tres períodos se establecieron a partir del análisis de tres tipos de isótopos radiactivos.

El período transcurrido desde la solidificación de los materiales fundidos que formaron la roca (edad de cristalización del material) se determinó mediante tres técnicas distintas de datación. La primera utilizaba isótopos de rubidio y estroncio; otra, neodimio y samario, y la tercera, argón. Los tres métodos fecharon la edad de la roca en 4500 millones de años. Desde el punto de vista geológico, la roca es antiquísima: 4500 millones de años significa que la roca cristalizó durante el primer uno por ciento de la historia de Marte. En cambio, los otros once meteoritos analizados tienen una antigüedad de entre 1300 millones y



3. MEDIANTE EL CALENTAMIENTO de un fragmento de meteorito procedente de Marte se obtuvo una gotita de agua marciana. La extracción la llevaron a cabo Haraldur R. Karlsson y sus colegas del centro espacial Johnson de la NASA. El agua líquida, que antaño hubo en la superficie de Marte, constituye una condición para la vida.

165 millones de años. Cabe destacar la oportunidad que se ha brindado a la ciencia al poder estudiar una roca tan antigua y tan poco alterada durante su estancia en Marte o en el hielo antártico.

La duración de la odisea espacial del meteorito se determinó mediante el análisis de otros isótopos: helio 3, neón 21 y argón 38. Mientras un meteorito está en el espacio lo bombardean rayos cósmicos y otras partículas de alta energía. Las partículas interactúan con los núcleos de átomos del meteorito produciendo los tres isótopos citados. A partir del análisis de la abundancia de estos isótopos y de su cadencia de producción, se puede determinar cuánto tiempo ha pasado el meteorito expuesto a flujos de altas energías y, por tanto, cuánto tiempo se ha mantenido en el espacio. Siguiendo con ese enfoque, se llegó a la conclusión de que ALH84001, una vez expulsado del planeta, estuvo 16 millones de años en el espacio antes de caer en la Antártida.

Para saber cuánto tiempo llevaba el meteorito entre hielos antárticos, A. J. Timothy Jull, de la Universidad de Arizona, midió carbono 14. En el espacio, cuando los silicatos se exponen a los rayos cósmicos, se genera carbono 14. Con el tiempo, las tasas de producción y destrucción del carbono 14 se equilibran y llegan a saturar el meteorito. El equilibrio se altera cuando el meteorito cae desde el espacio y cesa la producción de carbono 14. La destrucción continúa, reduciéndose a la mitad la cantidad de carbono 14 cada 5700 años. El tiempo de permanencia del meteorito en la Tierra puede calcularse mediante la determinación de la diferencia entre el nivel de saturación y la cantidad observada de silicatos. Para Jull, ALH84001 cayó del espacio hace 13.000 años.

Desde el momento de su descubrimiento nuestro meteorito pareció bastante extraño. Lo había encontrado en 1984 Roberta Score, en el glaciar Far Western, de la región de Allan Hills. Score, geóloga, advirtió en seguida que aquel pedazo gris verdusco claro era algo singular. Analizado, el meteorito resultó estar constituido en un 98 por ciento de ortopiroxina de grano grueso [$(Mg,Fe)SiO_3$], un mineral de sílice, y asimismo, en cantidades menores, de vidrio feldespático, o maskelinita ($NaAlSi_3O_8$), olivina [$(Mg,Fe)_2SiO_4$], cromita ($FeCr_2O_4$) y pirita (FeS_2), así como fases de carbonatos y filosilicatos.

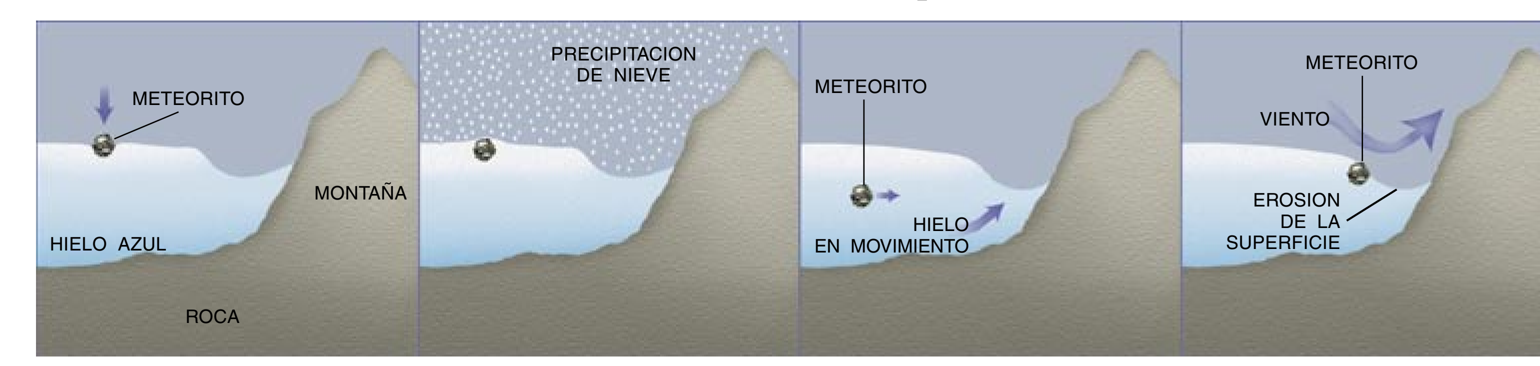
El aspecto más interesante de ALH84001 son los carbonatos, que se presentan en pequeños discos, cual esferitas aplastadas, de entre 20 y 250 micras de diámetro. Cubren las paredes de las grietas del meteorito y se orientan de tal modo que se adhieren a las paredes interiores de las fracturas. Según parece, los glóbulos precipitaron de un fluido saturado de dióxido de carbono que percolaba por la fractura después de la formación de los silicatos. Ninguno de los otros 11 meteoritos procedentes de Marte tiene glóbulos de este tipo.

Nuestro equipo de investigación halló en los glóbulos de carbonato un haz de características únicas, lo que nos permitió plantear como hipótesis que los organismos microbianos entraron en contacto con la roca en un pasado lejano. En realidad, la defensa de una antigua vida microbiana en Marte se basa precisamente en estos glóbulos.

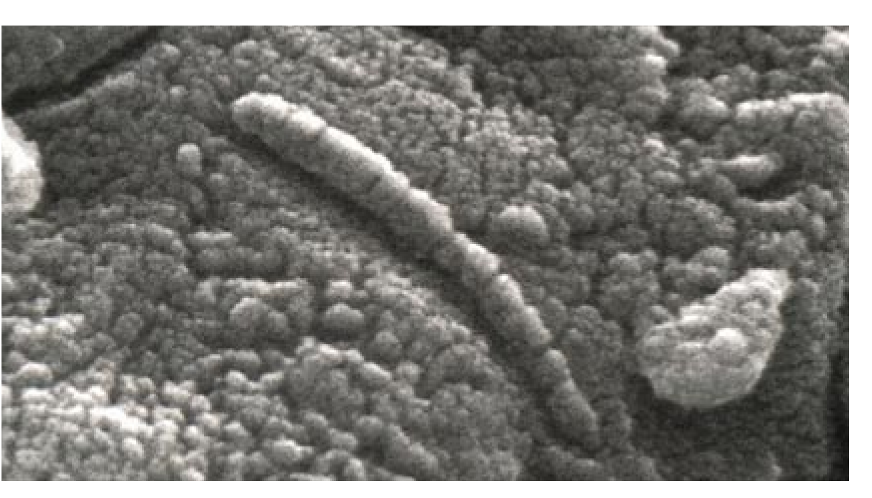
Tomadas una a una, ninguna de estas características prueba la existencia de vida. Consideradas en conjunto, sin embargo, y atendiendo de modo particular a los márgenes discoidales, podemos ver en los glóbulos vestigios de vida microbiana. Las características se enmarcan en distintas categorías de indicios. La primera categoría se refiere a la presencia de minúsculos granos de óxidos y sulfuros de hierro, semejantes a los producidos por bacterias terrestres. El segundo grupo gira alrededor de la presencia de moléculas de carbono orgánico en los glóbulos. Por último, las insólitas estructuras halladas en los glóbulos guardan un sorprendente parecido con los fósiles de bacterias encontrados en la Tierra. Otro elemento probatorio muestra que los glóbulos precipitaron de un fluido rico en agua a menos de 100 grados C.

Los investigadores del centro espacial Johnson de la NASA junto con Monica Grady, del Museo Británico de Historia Natural, y personal

Una económica sonda espacial



La combinación de fenómenos geológicos y meteorológicos lleva los meteoritos a los pies de la base de las montañas antárticas. Después de aterrizar, los meteoritos quedan enterrados por nieve, que, comprimida, termina por transformarse en hielo. Las capas de hielo se van corriendo hacia los márgenes del continente, trasladando con ellas los meteoritos. Si una montaña bloquea el movimiento horizontal de los meteoritos, con el tiempo éstos quedarán al descubierto junto a la montaña. La razón es que los vientos, de una manera lenta y continua, eliminan por ablación el hielo suprayacente, convirtiéndolo en gas. El proceso de ablación deja al descubierto hielo que había estado profundamente enterrado. Así, los meteoritos suelen encontrarse en hielo de más de 10.000 años de antigüedad y color azulado.





4. SECCION DE UN OBJETO de 380 nanómetros de largo (*arriba a la izquierda*) en un glóbulo de carbonato del meteorito ALH84001. La minúscula estructura se asemeja a bacterias fósiles halladas en la Tierra. En este orden se cree que el objeto más o menos vertical, a la derecha de la otra fotografía, es un microfósil. Su longitud también es de 380 nanómetros. Esta estructura, sin embargo, se encontró a 400 metros de profundidad (en el estado de Washington), incluido en la formación geológica denominada "Basalto del Río Columbia".

técnico de la Universidad a Distancia del Reino Unido realizaron el primer análisis de isótopos de carbono y oxígeno de los glóbulos de carbonato. El análisis del carbono indica que los glóbulos poseen más carbono 13 que otros carbonatos de la Tierra y la cantidad justa para proceder de Marte.

La mayor parte del carbono terrestre se compone en un 98,9 por ciento de carbono 12 y un 1,1 por ciento de carbono 13. La proporción pueden alterarla distintas reacciones químicas. Así, una muestra de carbono que haya formado parte de un sistema químico orgánico, materia vegetal por ejemplo, está algo más enriquecida en carbono 12, mientras que el carbono de una caliza lo está en carbono 13. El carbono de los glóbulos del ALH84001 está más enriquecido en carbono 13 que cualquier otra materia natural de la Tierra. De donde se postula que el carbono de los glóbulos —a diferencia de las trazas observadas en los otros once meteoritos marcianos— procedería de la atmósfera de Marte.

El análisis de la distribución de los isótopos de oxígeno y de los carbonatos puede proporcionar información sobre la temperatura a la que aparecieron estos minerales. Cuestión ésta que desemboca en otra: la de si se formaron acaso los carbonatos a las temperaturas en que podían medrar los microorganismos. Los organismos terrestres no sobreviven a temperaturas superiores a los 115 grados C. El equipo analizó los isótopos de oxígeno de los glóbulos de carbonato. Se comprobó que los glóbulos se formaron a temperaturas no superiores a los 100 grados C. A principios de 1997, John W. Walley, de la Universidad de Wisconsin en Madison, confirmó nuestro descu-

---

En 1969, un equipo de glaciólogos japoneses que trabajaban cerca de las montañas Yamato de la Antártida descubrieron ocho meteoritos en un glaciar de más de 10.000 años de antigüedad. Fue un descubrimiento importante ya que los meteoritos eran de cuatro tipos distintos, señal de que no habían caído contemporáneamente ni eran fragmentos del mismo meteorito.

No tardaron los glaciólogos en imaginarse el proceso que llevó a rocas quedar incluidas en el hielo: los meteoritos caídos en la nieve, que, comprimida y convertida en firn, acaba por transformarse en hielo. Este, andando el tiempo, se torna azulado, característica del hielo viejo.

Movidas por la gravedad, las masas de hielo se desplazan a un ritmo de dos o tres metros al año desde el elevado interior del continente hasta sus márgenes (*izquierda*). Si un obstáculo —una cadena montañosa— impide el corrimiento del hielo, la masa de hielo empuja hacia arriba, contra la barrera. El hielo, y los meteoritos que contiene, no pueden avanzar horizontalmente. Mientras tanto, a medida que los vientos soplan sobre ella, retiran la capa superficial de hielo en un proceso de ablación. Mediante dicho proceso el hielo se transforma directamente en gas y se eliminan unos dos o tres centímetros de hielo al año. Conforme va menguando el hielo, los meteoritos quedan expuestos en la superficie. De ese modo, los meteoritos sufren un enterramiento y exhumación continuos al pie de las montañas de la Antártida. Debido a que la ablación expone áreas de hielo que habían estado profundamente enterradas en el firn, los meteoritos se encuentran siempre en regiones de antiguo y azulado hielo. En ninguna otra parte del mundo se da este maravilloso mecanismo de concentración. Sólo en la Antártida existe la combinación necesaria de glaciares en movimiento y barreras montañosas.

En los últimos 28 años, varios equipos científicos han recuperado más de 17.000 meteoritos. La gran mayoría proceden del cinturón de asteroides, pero en la Antártida se han recogido también 14 muestras procedentes de la Luna y seis de Marte.

Entregados libres de cargo, a los meteoritos se les ha llamado las sondas del pobre. Antes del "alijo" de meteoritos en la Antártida, el número total de meteoritos en el mundo ascendía a tan sólo unos 2000 o 2500 especímenes.

brimiento mediante el uso de una técnica de microsonda iónica.

Debemos destacar que otro grupo de investigación, liderado por Ralph P. Harvey, de la Universidad Case Western Reserve, ha analizado la composición química de los minerales de los carbonatos con una microsonda electrónica y ha resuelto que los carbonatos se formaron a 700 grados C. Pero, desde nuestro punto de vista, esa conclusión de Harvey choca con el creciente número de datos que hablan de una formación de los glóbulos a temperaturas relativamente bajas.

Por otro lado, conocer la edad de los carbonatos nos permitiría estimar cuándo la vida microbiana dejó su huella en la roca ALH84001. De todos modos, podemos asegurar que los carbonatos cristalizaron en las grietas tiempo después de que lo hiciera el meteorito. Distintos grupos de investigación han propuesto edades comprendidas entre los 1300 millones y los 3600 millones años. Este intervalo, muy amplio, resulta insuficiente para fechar los glóbulos de un modo tajante.

El primer grupo de pruebas pivota en torno a la observación de ciertos minerales que aparecieron en el interior de los glóbulos de carbonato. El tipo y orden de los minerales son similares, por no decir idénticos, a ciertos biominerales de la Tierra. En su interior, los glóbulos, ricos en magnesita ($MgCO_3$) y siderita ($FeCO_3$), contienen pequeñas cantidades de carbonatos de calcio y manganeso. En los carbonatos también están presentes partículas de magnetita (Fe_3O_4) y sulfuros de tamaños entre los 10 y 100 nanómetros de lado. Los cristales de magnetita tienen formas cúbicas o irregulares y estructuras bien conservadas, con algún defecto o restos de impurezas.

Del análisis de las muestras, realizado por microscopía electrónica de transmisión de alta resolución y espectroscopía de disipación de energía, se desprende que el tamaño, pureza, morfología y estructura de los cristales de estas magnetitas son propias de las magnetitas generadas por bacterias de la Tierra.

Las partículas de magnetita terrestre asociadas a bacterias fósiles se denominan magnetofósiles. Se encuentran en suelos y sedimentos muy diversos y se clasifican, según su tamaño, en superparamagnéticas (de menos de 20 nanómetros de lado) o de dominio único (de 20 a 100 nanómetros). Las magnetitas de ALH84001 miden de 40 a 60 nanómetros de lado.

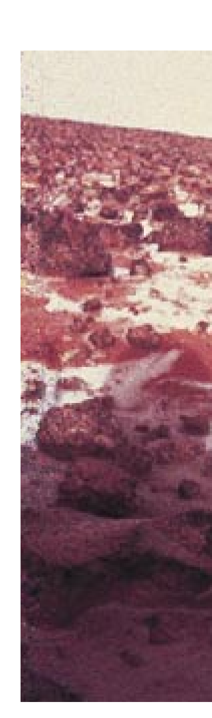
Las magnetitas de dominio único se han observado en calizas antiguas terrestres. Se las considera de origen bacteriano. Más misteriosas resultan algunas de las magnetitas de ALH84001, ordenadas en cadenas a la manera de perlas ensartadas en un collar. Es corriente que las bacterias terrestres produzcan magnetitas según este mismo patrón ya que, al procesar biológicamente el hierro y el oxígeno del agua, los cristales se alinean siguiendo el campo magnético de la Tierra.

La presencia de moléculas de carbono orgánico en el ALH84001 constituye el segundo grupo de pruebas. Hace pocos años los investigadores hallaban moléculas orgánicas en meteoritos, no sólo en los de origen marciano, sino también en los procedentes del cinturón de asteroides del espacio interplanetario, que difícilmente puede albergar vida. La presencia de moléculas orgánicas naturales en ALH84001 es la primera prueba de que hubo tales moléculas en Marte.

En la Tierra, al entrar en descomposición los organismos muertos, forman hidrocarburos asociados al carbón, la turba y el petróleo. Muchos de estos hidrocarburos pertenecen a una clase de moléculas orgánicas conocidas como hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). Existen miles de HAP diferentes. Su simple presencia en una muestra no prueba que haya existido un proceso biológico. El interés de su descubrimiento estriba en su asociación con los glóbulos de carbonato.

En ALH84001, los HAP aparecen siempre en regiones ricas en carbonatos e incluso en los mismos glóbulos. Creemos que los HAP relativamente simples son el producto de la descomposición de los organismos vivos arrastrados por un fluido y atrapados durante la formación de los glóbulos. En 1996, un equipo de la Universidad a Distancia inglesa mostró que el carbono de los glóbulos de carbonato de ALH84001 posee una distribución de isótopos que supone la existencia de microorganismos que usaron metano por fuente de alimentación. Si se confirma, este hallazgo se convertiría en una prueba clave que confirmaría sin sombra de duda la huella de actividad biológica en la roca.

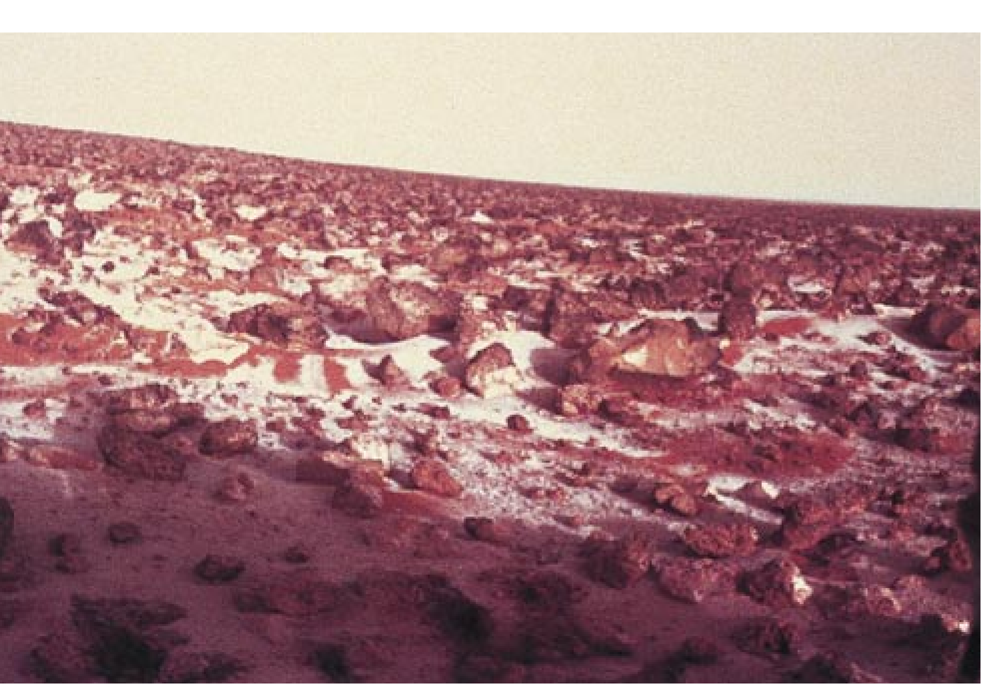
En 1996, Richard N. Zare y Simon J. Clemett, de Stanford, emplearon una técnica de análisis extremadamente sensible para demostrar que ALH84001 contiene un número pequeño de HAP, cada uno de los cuales se ha podido identificar en los productos de descomposición de los microorganismos. Además, y ello es muy importante, considerando que se hallaron en el interior del meteorito, no es probable que se deban a contaminación alguna. Este hallazgo, crucial, respalda la tesis del origen marciano de los carbonatos, que encierran vestigios de antiguos organismos vivos.



Los HAP, componentes de los gases de escape de los automóviles, se dan en meteoritos, partículas de polvo cósmico e incluso en el espacio interestelar. De manera muy significativa, los análisis ultrasensibles de la distribución de HAP en ALH84001 indicaron que éstos no procedían ni de la Tierra ni de otra fuente extraterrestre que no fuera Marte.

Pero quizá la pista más sólida de que al menos vestigios de microorganismos tuvieron contacto con la roca la aporten los objetos que parecen ser restos fósiles de microorganismos. Un examen detallado de los carbonatos de ALH84001, mediante microscopía electrónica de barrido de alta resolución (SEM), reveló rasgos poco corrientes, similares a los observados en muestras terrestres asociadas a actividad biogénica. Las observaciones del SEM muestran que los glóbulos de carbonato contienen cuerpos ovoides y tubulares. Los objetos miden unos 380 nanómetros de longitud, lo que significa que pudiera tratarse de restos fosilizados de bacterias. Entre los componentes necesarios para el funcionamiento de las bacterias terrestres aparece el tamaño, que debe ser de al menos 250 nanómetros. Algunas estructuras tubulares y curvas halladas en los glóbulos abarcan entre 500 y 700 nanómetros.

Otros objetos observados en ALH84001 son casi del tamaño mínimo de las bacterias. Estos ovoides tienen tan sólo entre 40 y 80 nanómetros de largo; otros cuerpos, de formas tubulares, miden de 30 a 170 nanómetros de longitud. Estos tamaños son 10 veces menores que los de las bacterias terrestres. A menudo, las células presentan apéndices, por lo



5. AGUA CONGELADA, probablemente de micrometros de espesor, cubre zonas del suelo marciano, rojo y rocoso, en una foto tomada por una sonda del Viking 2, en mayo de 1979. La imagen se consideró una prueba más de la existencia de agua en la superficie de Marte, aunque en estado sólido.

general, muy pequeños, de tamaños parecidos a las formas observadas en ALH84001. Es posible que algunas de estas formas sean fragmentos o partes de unidades mayores.

Por otro lado, las numerosas formas ovales y alargadas del ALH84001 son, en esencia, de la talla de las nanobacterias terrestres. Se han estudiado poco las nanobacterias o bacterias de tamaños comprendidos entre los 20 y los 400 nanómetros. Pero se han encontrado bacterias fósiles en el interior de muestras de basalto procedentes de la depresión del río Columbia de características casi idénticas a las observadas en los ovoides de ALH84001.

ALH84001 se encontraba en Marte hace 4500 millones de años, cuando el planeta era más cálido y húmedo; cuando su atmósfera era, también, más densa. Cabe, pues, esperar observar indicios de la alteración de la roca por su contacto con el agua. Sin embargo, la piedra ofrece pocas señales de alteración por agua. Un elemento probatorio serían los minerales arcillosos producidos por reacción con el agua. Y ocurre que el meteorito contiene, en efecto, filosilicatos arcillosos minerales, aunque en cantidades residuales. Además, tampoco queda claro si la arcilla mineral se formó en Marte o en la Antártida.

A principios de su historia, Marte tuvo agua líquida en su superficie y puede que aún goce de un sistema activo de aguas subterráneas, bajo el permafrost o criosfera. Si durante el período en que el agua líquida cubría partes de Marte evolucionaron en su superficie microorganismos, éstos debieron de refugiarse en ambientes subterráneos cuando las condiciones superficiales se endurecieron. La superficie de Marte contiene mucho basalto que, indudablemente, se fracturó durante un período de bombardeo de meteoritos en los primeros 600 millones de años de su historia. Estas fracturas pudieron servir de cauce para el agua líquida y haber albergado biotas que se fueron adaptando a las condiciones ambientales del planeta. La situación se repite en la Tierra: allí donde finos espacios entre las sucesivas coladas de lava se convierten en acuíferos por los que circula agua subterránea que contiene vida bacteriana.

Por otro lado, los organismos pueden haberse desarrollado en fuentes termales o en sistemas hidrotermales subterráneos de Marte, donde los desequilibrios químicos pueden mantenerse en ambientes análogos, ricos en minerales, a los existentes en el fondo submarino de la Tierra.

Por tanto, resulta absolutamente posible que los organismos que existieron en Marte en un pasado lejano existan todavía. La disponibilidad de agua subterránea facilitaría su supervivencia. Si los carbonatos de ALH84001 tienen origen biológico y se formaron hace 3600 millones de años, cabe que sean vestigios de la primitiva vida marciana.

Por el momento, los resultados de los análisis de ALH84001 coinciden en los vestigios de antigua vida microbiana en los glóbulos de carbonato. Pero no han concluido las investigaciones del meteorito. Confirmen o modifiquen nuestra hipótesis los estudios acometidos, serán experiencias de incalculable valor que servirán para futuras inquisiciones. Es de esperar que en el 2005 se envíe una misión robotizada con el objeto de recoger muestras de roca y suelo marcianos y nos las traiga a la Tierra dos años y medio después. Para despegar de la superficie marciana y regresar a la Tierra, esta revolucionaria misión puede usar oxígeno producido en la superficie de Marte, descomponiendo el dióxido de carbono de su atmósfera.

A través de tales proyectos terminaremos por contar con los datos que nos permitan determinar de forma concluyente si existió o no vida en Marte. Finalmente, estas investigaciones podrán dar perspectiva a uno de los grandes misterios de la ciencia: la extensión de la vida en el cosmos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MARS. Dirigido por Hugh H. Kieffer, Bruce M. Jakosky, Conway W. Snyder y Mildred S. Matthews. University of Arizona Press, 1992.

WHAT WE HAVE LEARNED ABOUT MARS FROM SNC METEORITES. Harry-Y. McSween, Jr., en *Meteoritics*, vol. 29, n.º 6, págs. 757-779; noviembre 1994.

SEARCH FOR PAST LIFE ON MARS: POSSIBLE RELIC BIOGENIC ACTIVITY IN MARTIAN METEORITE ALH84001. David S. McKay et al. en *Science*, vol. 273, págs. 924-930: 16 de agosto 1996.

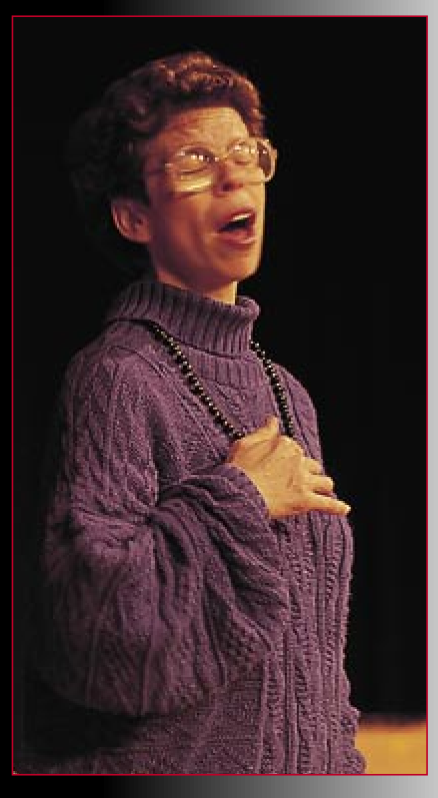
VIDA EN LAS PROFUNDIDADES DE LA TIERRA. James K. Fredrickson y Tullis C. Onstott, en *Investigación y Ciencia*, págs. 22-28, diciembre de 1996.

WATER ON MARS. Michael H. Carr. Oxford University Press, 1996.

DESTINATION MARS: IN ART, MYTH AND SCIENCE. Jay Barbree y Martin Caidin, con Susan Wright. Penguin Studio, 1997.







Síndrome de Williams

Para adentrarse en las complejidades de la organización del cerebro, los científicos empiezan a interesarse por una enfermedad de la que hasta ahora se sabe muy poco

Howard M. Lenhoff, Paul P. Wang, Frank Greenberg y Ursula Bellugi

En cierta ocasión pidieron a una adolescente con un cociente intelectual de 49 que dibujara un elefante y relatara por escrito todo lo que conocía acerca del animal. No hubo quien entendiera el garabato. Pero su descripción resultó de una riqueza impresionante, con ribetes de lirismo. Entre otras cosas, decía: "Tiene unas enormes orejas grises, orejas como abanicos, orejas que hacen soplar el viento..."

La expresividad de la joven en cuestión es típica de personas con síndrome de Williams. Se trata de una afección poco común que ha comenzado a despertar el interés de distintas ramas de la ciencia. Aunque no todos los individuos que padecen el síndrome presentan idéntica sintomatología, suelen parecerse entre sí. Se les aplica con frecuencia el diagnóstico de "retraso mental" moderado y, por lo general, su cociente intelectual, según reflejan las pruebas al uso, es bajo. Leen y escriben mal y tienen muchas dificultades con las operaciones aritméticas, incluso las sencillas. En otros campos, sin embargo, hacen gala de una finura extraordinaria. No sólo tienen facilidad para la expresión oral, sino también para el reconocimiento de caras. En conjunto, tienden a la locuacidad y la sociabilidad. Su empatía es manifiesta.

Además, y aunque los datos sean anecdóticos, algunos de estos pacientes poseen un talento musical extraordinario. Aun cuando su grado de atención para la mayoría de las tareas sea limitado, muchos escuchan música o tocan instrumentos con una persistencia sorprendente. Pese a que la mayoría se revela incapaz de leer las notas musicales, destacan por su oído finísimo y un sorprendente sentido del ritmo. Un muchacho aprendió con gran facilidad a tocar simultáneamente con una mano un tambor con un tiempo 7/4, y con la otra otro tambor con un tiempo 4/4. Muchos de estos individuos retienen en su memoria durante años composiciones musicales complejas y recuerdan la melodía y la letra de largas baladas. Conocemos a uno que canta canciones en 25 idiomas. Los más experimentados improvisan e interpretan melodías con extraordinaria facilidad.

Este tipo de anécdotas ha despertado el interés por el estudio sistemático de la capacidad musical de los niños afectados por el síndrome de Williams. Los resultados indican

1. LOS ENFERMOS CON SINDROME DE WILLIAMS mezclan excelencias y limitaciones. Cuando se pidió a una muchacha con cociente intelectual de 49 que dibujase y describiese un elefante trazó unos garabatos, incomprensibles en sí mismos. Agregó, sin embargo, una vívida descripción oral (*página opuesta*). Algunos individuos poseen un notable talento musical; el pasado verano, los que aparecen en la fotografía de la izquierda —de arriba abajo: Julia Tuttle, Brian Johnson y Gloria Lenhoff (hija de Howard M. Lenhoff, uno de los autores de este artículo)— participaron en un campamento de música y artes para enfermos con el síndrome de Williams celebrado en Belvoir Terrace en Lenox, estado de Massachusetts.

que los jóvenes distinguen bien las melodías; se interesan por la música y responden emotivamente con viveza mucho mayor que el resto de la población. Cierto muchacho confesaba que "la música es mi manera favorita de pensar".

Los científicos se sienten atraídos por el síndrome de Williams, en parte porque sospechan que las excelencias y las carencias de los individuos afectados proporcionarán una nueva ventana que permita observar la organización y maleabilidad del cerebro normal. Algunos grupos intentan localizar habilidades características en el cerebro de estos enfermos y determinar la influencia de esas habilidades en la actividad intelectual o de otro tipo. Se proponen, además, descubrir las anomalías genéticas que subyacen en el síndrome de Williams.

En 1993 se descubrió que esta afección se debía a la pérdida de cierta región minúscula de una de las dos copias del cromosoma 7 presente en cada una de las células del organismo. El fragmento que ha sufrido la deleción contendrá 15 o más genes. A medida que los genes afectados por la deleción se vayan conociendo, se irá determinando el mecanismo en virtud del cual su ausencia conduce a alteraciones neuroanatómicas y engendra los tipos de comportamiento observados. Este enfoque integrado del estudio del síndrome de Williams —que busca la interrelación entre genes, neurobiología y comportamiento— puede convertirse en un modelo para explorar la forma en que los genes inciden en el desarrollo y función del cerebro.

La patología médica se interesa obviamente por el síndrome de Williams. El análisis de los genes en la región delecionada permite explicar por qué los enfermos de Williams padecen además otras alteraciones físicas. Se han acometido ensayos prenatales que facilitan un diagnóstico precoz de la enfermedad, medidas de enorme interés para que los pacientes reciban la ayuda y cuidados necesarios desde los primeros momentos de la vida y conseguir que desarrollen al máximo todas sus capacidades. El desconocimiento clínico de las características del síndrome de Williams y la ausencia de pruebas fiables han obstaculizado en el pasado el diagnóstico precoz de esta patología.

Progreso lento de la medicina

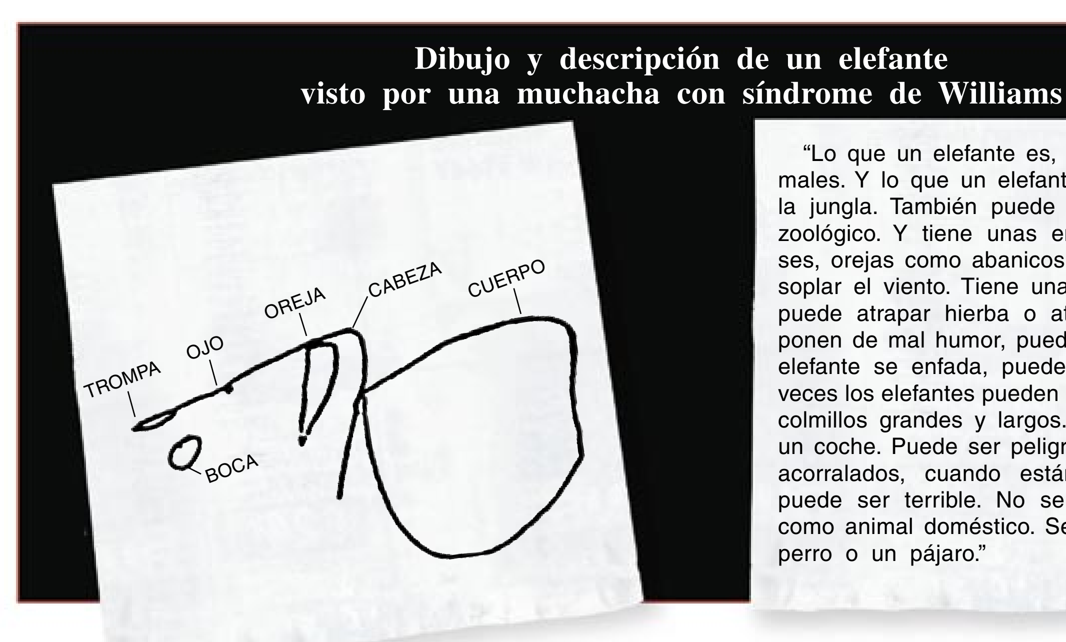
Aunque el síndrome de Williams, que se presenta en uno de cada 20.000 nacimientos en la población mundial, haya atraído un creciente interés en los últimos tiempos, no era en absoluto desconocido. Del trabajo de uno de los autores (Lenhoff) se desprende que los enfermos inspiraron historias en que intervenían una pléyade de personajes fantásticos: elfos, gnomos, duendes y otros.

Pero, por lo que al mundo médico se refiere, éste no se ha percatado de la existencia del síndrome hasta muy recientemente; no hace más de 40 años. En 1961 J. C. P. Williams, un cardiólogo neozelandés, advirtió que un subgrupo de sus pacientes pediátricos compartían determinados síntomas. Además de problemas cardiovasculares semejantes, tenían rasgos de elfos (como la nariz respingona y barbilla reducida) y eran, al parecer, retrasados mentales. Entre los problemas que Williams observó aparecían soplos cardiacos y estrechamiento de los vasos principales. En particular, los enfermos con el síndrome de Williams padecen con frecuencia estenosis supravalvular aórtica (ESVA), una constricción entre leve y severa de la aorta.

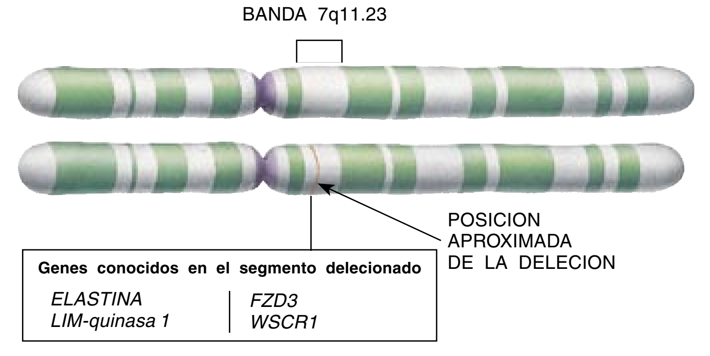
De entonces acá, los médicos han observado la presencia de otros rasgos, algunos de los cuales se manifiestan desde los primeros momentos de la vida. Muestran dificultades para la lactación y sufren dolores de estómago, estreñimiento y hernias. Duermen mal y pueden ser muy irritables, un comportamiento causado por otro signo frecuente: concentraciones elevadas de calcio en la sangre. A medida que crecen, su voz se hace ronca y proceden con suma lentitud en el desarrollo, tanto físico como mental. Por término medio empiezan a andar hacia los 21 meses, a menudo sobre los talones, algo que suele persistir a lo largo de toda la vida y que les confiere un aspecto extraño. El control motor fino está también alterado. Además, estos pacientes, muy sensibles al ruido, suelen tener una estatura inferior a la de los niños de su edad y parecen envejecer prematuramente (con arrugas prematuras y cabello gris).

Estas descripciones dieron paso a una comprensión genética, gracias en parte a un estudio de la ESVA en personas que no presentaban el síndrome de Williams. En 1993, Amanda K. Ewart y Mark T. Keating, de

Dibujo y descripción de un elefante visto por una muchacha con síndrome de Williams



"Lo que un elefante es, es uno de los animales. Y lo que un elefante hace es vivir en la jungla. También puede vivir en el parque zoológico. Y tiene unas enormes orejas grises, orejas como abanicos, orejas que hacen soplar el viento. Tiene una trompa larga que puede atrapar hierba o atrapar heno. Si se ponen de mal humor, puede ser terrible. Si el elefante se enfada, puede dar trompazos. A veces los elefantes pueden atacar. Tienen unos colmillos grandes y largos. Pueden estropear un coche. Puede ser peligroso. Cuando están acorralados, cuando están de mal humor, puede ser terrible. No se tiene un elefante como animal doméstico. Se tiene un gato, un perro o un pájaro."



CELULA NORMAL

CELULA DEL SINDROME DE WILLIAMS

AUSENCIA DE SEÑAL ROJA

2. UNA DELECION MINUSCULA en una de las dos copias del cromosoma 7 de las células del organismo es la causa del síndrome de Williams (*dibujo*). La región ausente puede contener 15 o más genes, de los que sólo han podido identificarse algunos. Una prueba diagnóstica se basa en un descubrimiento reciente: el gen de la elastina se encuentra entre los que se han perdido. La prueba consiste en señalar las copias del cromosoma 7 con un marcador fluorescente de color verde y el gen con otro marcador fluorescente de color rojo. Los cromosomas (*azul*) de un sujeto normal (*microfotografía, arriba*) muestran dos señales verdes y dos rojas, prueba de que ambas copias del cromosoma 7 están presentes y que cada una lleva el gen de la elastina. Los enfermos de Williams, sin embargo, carecen de una de las copias del gen y, por tanto, una de las copias del cromosoma 7 no presenta la señal roja (*microfotografía, abajo*).

la Universidad de Utah, Colleen A. Morris, de la Universidad de Nevada, y otros descubrieron que, para un segmento de esta población, la ESVA tenía su origen en una mutación heredada en una copia del gen que cifraba la elastina, proteína que confiere elasticidad a muchos órganos y tejidos, como las arterias, pulmones, intestinos y piel.

Identificación de los genes ausentes

Sabedores de que la ESVA era una condición común en los pacientes con síndrome de Williams y que los pacientes con sólo ESVA familiar y los individuos con síndrome de Williams presentan alteraciones en órganos que requieren elasticidad, los investigadores se plantearon la posibilidad de que el síndrome de Williams implicara también algún cambio en el gen de la elastina. La búsqueda dio fruto. Se descubrió la existencia de una deleción que afectaba a una de las dos copias del gen en el cromosoma 7 de las células. Dicha deleción ocurre aproximadamente en el 95 por ciento de los pacientes con síndrome de Williams. La pérdida es nociva, por la razón presumible de que se necesiten ambas copias del gen para producir la proteína elastina en cantidades adecuadas.

Se sabía con anterioridad que una reducción en el suministro de elastina podía ser responsable de varios rasgos físicos del síndrome de Williams (como la ESVA, hernias y la aparición prematura de arrugas), aunque no podía explicar por sí sola las alteraciones cognitivas o del comportamiento. Después de todo, los primeros individuos estudiados, que padecían sólo la ESVA sin alteraciones cognitivas, hubieran revelado también un cociente intelectual bajo, si una disminución de la elastina hubiera sido la única responsable de todos los síntomas del síndrome de Williams. Esto indujo a sospechar la posible implicación de otros genes. Hipótesis que recibió el respaldo de los resultados obtenidos tras el examen directo de los cromosomas de pacientes de Williams, que indicaban que la región en que se había producido la deleción del cromosoma 7 se extendía hasta los límites del gen de la elastina, y con toda seguridad abarcaba otros muchos genes.

Empezamos ya a conocer los genes implicados. De ellos, tres (*LIM-quinasa 1, FZD3* y *WSCR1*) son activos en el cerebro, prueba de que podrían influir en el desarrollo y función del cerebro. Se desconocen las actividades exactas de las proteínas codificadas, aunque Ewart y sus colaboradores han propuesto que la LIM-*quinasa* 1 (invariablemente delecionada junto con el gen de la elastina) pudiera intervenir en la capacidad para captar las relaciones espaciales. Esta función podría ayudar a comprender por qué los pacientes con síndrome de Williams hallan dificultad a la hora de dibujar de memoria objetos elementales. Otro gen de la zona delecionada, el *RFC2*, especifica una proteína involucrada en la replicación del ADN, aunque no ha podido confirmarse su participación en el síndrome de Williams.

Queda mucho por conocer sobre el sustrato genético del síndrome de Williams. Al descubrimiento de la deleción en el cromosoma 7 han seguido algunas recompensas de índole práctica. Que la deleción ocurra en todas las células del organismo en los pacientes de Williams obliga a descartar la posibilidad de que se debiera a algo que la madre hubiera hecho u omitido durante el embarazo. La alteración tiene su origen en un óvulo o un espermatozoide que sufrieron la pérdida de genes en el cromosoma 7 antes de entregar sus cromosomas para la creación de un embrión. Esto explica también por qué en los hermanos sanos de los pacientes con síndrome de Williams

HOWARD M. LENHOFF, PAUL P. WANG, FRANK GREENBERG y URSULA BELLUGI abordan el síndrome de Williams desde perspectivas complementarias. Lenhoff es profesor emérito de ciencias biológicas de la Universidad de California. Tiene una hija que padece esa enfermedad. Wang enseña pediatría en la facultad de medicina de la Universidad de Pennsylvania y se dedica al estudio de las manifestaciones neurológicas y del comportamiento en enfermedades congénitas, incluida la de Williams. Más de 20 años lleva Greenberg trabajando con enfermos que padecen el síndrome de Williams. Bellugi dirige el laboratorio de neurociencias del Instituto Salk.

no está presente esa deleción en el cromosoma 7. Así pues, la posibilidad de que éstos engendren hijos con el síndrome de Williams no es mayor que en el resto de la población. Por último, las técnicas microscópicas que revelaron la deleción del gen de la elastina —hibridación *in situ* fluorescente, o FISH— se han adoptado como prueba diagnóstica.

Emerge un perfil cognitivo

El trabajo sobre la genética del síndrome de Williams sirve de complemento a los esfuerzos encaminados a especificar las características neurobiológicas de esta afección. Esas investigaciones, que en la actualidad se llevan a cabo en varios laboratorios, comenzaron hace unos 15 años, cuando uno de nosotros (Bellugi) contestó una llamada telefónica, ya entrada la noche, en su laboratorio del Instituto Salk de Estudios Biológicos en La Jolla, California. Al otro lado del cable estaba una madre que sabía que la doctora Bellugi investigaba las bases neurobiológicas del lenguaje y pensaba que su hija, que tenía el síndrome de Williams, sería de interés para el grupo del Instituto Salk. La niña, de 13 años y cociente intelectual 50, la habían catalogado como deficiente mental. De acuerdo con ese perfil, la niña leía y escribía como si tuviera 5 o 6 años. Y, sin embargo, se expresaba con una extraordinaria belleza.

No estaba entonces solucionado, ni lo está ahora, el problema de distinguir los procesos cerebrales que controlan el lenguaje de los que controlan el razonamiento. En la población en general, las capacidades cognitivas y las del lenguaje van de la mano. La dicotomía que presentaba la hija sugería que el estudio de los pacientes con el síndrome de Williams podría contribuir a desglosar ambos procesos.

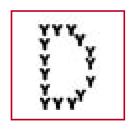
Fascinada por la noticia, Bellugi aceptó recibir la visita de la niña, y desde entonces la siguió viendo con regularidad. Empezó a buscar en la bibliografía descripciones sobre las excelencias y limitaciones de los pacientes de Williams, aunque sólo encontró ideas muy vagas. Antes de que Bellugi pudiera pensar en descubrir las áreas del cerebro y los procesos neurobiológicos que explicasen las características, un tanto especiales, de los pacientes de Williams, necesitaba un perfil mucho más ceñido que le permitiera encajar los rasgos distintivos y diferenciales en la comparación con otros individuos. Bellugi y sus colaboradores comenzaron a diseñar pruebas para estudiar capacidades específicas y comparar el grupo de enfermos de Williams con el resto de la población y el grupo de otros enfermos con alteraciones de sus capacidades cognitivas: el de los enfermos con síndrome de Down.

En las investigaciones ahora en curso se examinan poblaciones de adolescentes según sexo, edad y cociente intelectual. (Los pacientes de Williams tienen cocientes intelectuales entre 40 y 100, con una media alrededor de 60.) Muy pronto, el equipo investigador vio que los enfermos de Williams, en contraste con sus limitaciones para las pruebas generales de capacidad cognitiva, se desenvolvían con soltura en el manejo de la gramática a la hora de expresarse de forma espontánea. En conjunto, aventajaban a los individuos

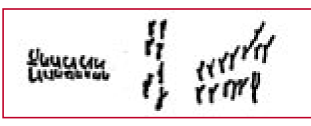
Un perfil cognitivo en formación

En su empeño por acotar los rasgos característicos del síndrome de Wil liams, los expertos han comparado individuos que sufren este síndrome con otros que padecen síndrome de Down. Se atenían a los resultados de pruebas que evaluaban destrezas específicas. Una de estas pruebas (*arriba*) —en que se pedía que el muchacho copiara de memoria una letra D dibujada mediante letras Y pequeñas— reveló la incapacidad para integrar los detalles en una configuración más amplia. Los afectados con el síndrome de Williams tendían a dibujar sólo las letras Y pequeñas, mientras que los que padecían el síndrome de Down tendían a conservar la configuración de conjunto, aunque omitiendo los detalles. Otra prueba —en la que se pedía a los individuos que inventaran una historia basada en una serie de dibujos sin palabras— reveló que los pacientes de Williams pueden crear a menudo narraciones bien estructuradas.

Tarea: REPRODUCIR LA IMAGEN



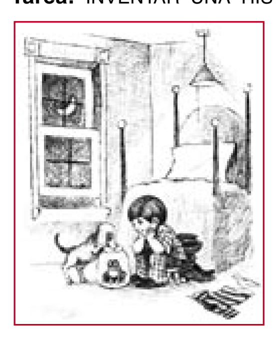
Enfermos de Williams

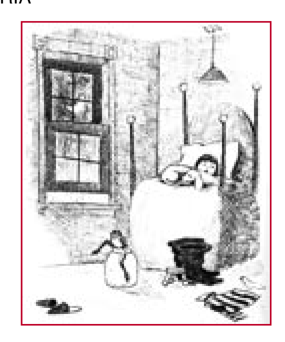


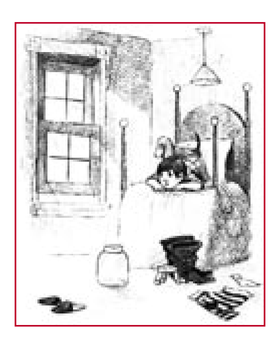
Enfermos de Down



Tarea: INVENTAR UNA HISTORIA





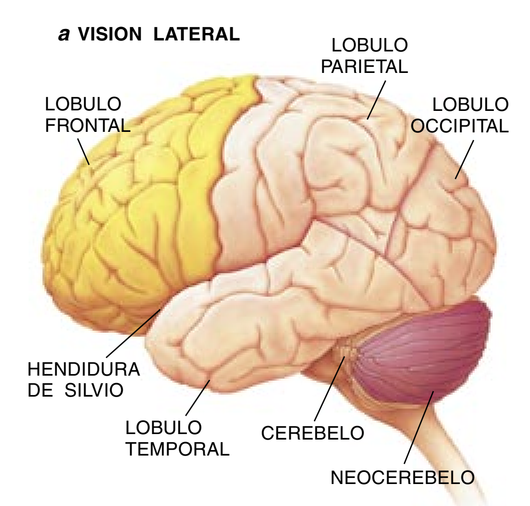


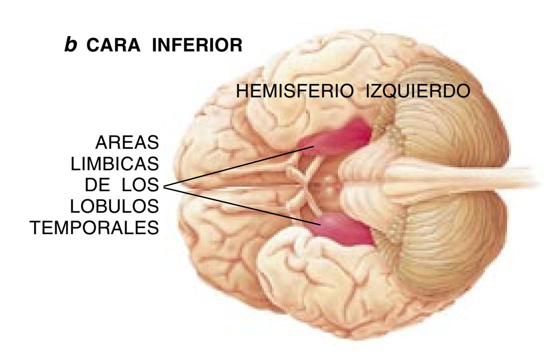
Enfermo de Williams, edad 17 años, cociente intelectual 50

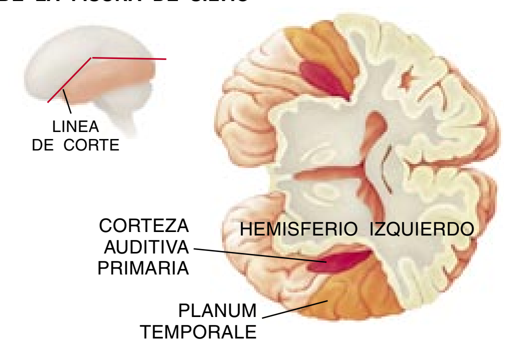
"Erase una vez cuando se hizo oscuro de noche, el niño tenía una rana. El niño estaba mirando a la rana, sentado en la silla, en la mesa, y el perro estaba mirando a la rana en el tarro. Aquella noche se durmió el niño y durmió mucho tiempo, y también el perro. Pero la rana no se iba a dormir. La rana salió del tarro. Y cuando la rana salió, el niño y el perro estaban todavía durmiendo. A la mañana siguiente era muy hermoso por la mañana. Había mucha luz, y el sol era agradable y calentaba. Entonces, de repente, cuando abrió los ojos, miró al tarro y entonces, de repente, la rana ya no estaba allí. El tarro estaba vacío. No había rana por ningún lado."

Enfermo de Down, edad 18 años, cociente intelectual 55"

"La rana está en el tarro. El tarro está en el suelo. El tarro en el suelo. Eso es. El taburete está roto. Los vestidos está tirado por ahí."







3. LA ANATOMIA BASICA del cerebro es normal en los enfermos con síndrome de Williams, aunque su volumen es algo menor. Las áreas que parecen estar mejor conservadas comprenden los lóbulos frontales y el neocerebelo (*a*), así como el área límbica (*b*), el área auditiva primaria y el planum temporale (*c*).

del grupo del síndrome de Down en las tareas que implicaban comprensión gramatical y creatividad.

Algunos resolvían con dominio tareas complejas del tipo de elaboración de preguntas así: "¿no es verdad que a ella le gusta el pescado?" matizando la fuerza expresiva. En alguna de estas pruebas hay que leer una frase inicial ("A María le gusta el pescado"). Después tiene que sustituir el nombre por un pronombre ("A ella le gusta el pescado"). Y después construir una pregunta con una cierta complejidad gramatical ("... no es verdad que...?").

Los investigadores del Instituto Salk se dieron cuenta también de algo que otros observaron más tarde: que los enfermos con síndrome de Williams utilizaban un vocabulario bastante más amplio de lo que cabía esperar de su edad mental. Cuando se les pedía que citaran algunos animales, no se contentaban con incluir palabras fáciles e incluían ejemplos exóticos como yak, mofeta, yaguané, cóndor, unicornio.

Además de poseer un vocabulario más rico, los individuos con síndrome de Williams tendían a ser más expresivos que los niños normales de su edad. Esta animación se ponía de manifiesto de manera divertida cuando a los pacientes se les pedía que construyeran una historia basada en una serie de dibujos sin palabras. A medida que relataban su cuento, alteraban el tono, el volumen, la longitud de las palabras o el ritmo para aportar mayor viveza y fuerza emocional al relato. También añadían interjecciones para captar y mantener despierto el interés del auditorio ("Y de repente, ¡zas, cataplum!"; "Y bum") con más frecuencia con que lo hacían los enfermos con síndrome de Down. (Por desgracia ocurre a veces que ese don de sociabilidad y fuerza expresiva puede confundir a los profesores, quienes fácilmente creen que esos niños tienen una capacidad de razonar mucho mayor que la que en realidad poseen; en esos casos esos niños pueden verse privados del apoyo que necesitan en sus tareas escolares.)

Una posible explicación de la capacidad para la expresión oral de que hacen gala los afectados con el síndrome de Williams es que su defecto cromosómico, en contraste con lo que ocurre con los pacientes de Down, puede no alterar ciertas facultades de apoyo del lenguaje. Otros investigadores, por ejemplo, han señalado que la memoria a corto plazo para los sonidos del lenguaje hablado, o "memoria fonológica", que al parecer está implicada en el aprendizaje de la lengua y en la comprensión, se conserva bastante bien en los pacientes con síndrome de Williams.

Interesa resaltar que los estudios realizados recientemente con niños italianos y franceses con síndrome de Williams inducen a pensar que quizá no se conserve tan bien como aparenta en ellos la morfología, parte de la gramática que trata de la conjugación de los verbos, el género y la formación del plural. (Esos idiomas, al igual que ocurre con el español, son mucho más ricos morfológicamente que el inglés.) De esa observación cabría inferir que las regiones cerebrales conservadas en el síndrome de Williams y la presencia de una memoria a corto plazo para los sonidos del lenguaje sirven de apoyo a muchas de las aptitudes verbales, aunque quizá no basten para el dominio completo del idioma.

En contraste con los buenos resultados que obtienen en las pruebas orales, los enfermos de Williams realizan peor las tareas que requieren elaborar las imágenes. El dibujar, por ejemplo. A menudo los fallos en este tipo de tareas difieren de los que se dan en los enfermos con síndrome de Down. Esa discrepancia abona la hipótesis de que las deficiencias en ambos grupos posean una base anatómico-cerebral. En este sentido, los enfermos con síndrome de Williams, al igual que los pacientes que han sufrido una apoplejía del hemisferio derecho del cerebro, pueden captar ciertos componentes de las imágenes, aunque no consigan apreciar el conjunto de la figura. Los enfermos con síndrome de Down, sin embargo, pueden tener más facilidad para percibir la organización global, pero sin fijarse en muchos de los detalles, como ocurre también en individuos que han sufrido una apoplejía del hemisferio izquierdo.

El perfil general que revelan las diversas pruebas cognitivas implica que el defecto cromosómico en el síndrome de Williams no afecta al hemisferio izquierdo (la región más importante para el lenguaje en la mayoría de la gente) y en cambio altera el hemisferio derecho (del que depende en mayor medida la visión espacial). Pero la expresividad emotiva de los pacientes con síndrome de Williams (que también se asocia con la actividad funcional del lado derecho) y, al menos, otro de los hallazgos hacen dudar de una explicación tan reduccionista. Los enfermos de Williams reconocen y distinguen bastante bien fotografías de caras que no les son familiares (una facultad en la que interviene el hemisferio derecho). En efecto, en este punto su capacidad es igual a la de los adultos de la población general.

Síndrome de Williams: ¿inspiración para cuentos de gnomos?

En las narraciones populares de muchas culturas aparecen “individuos pequeñitos” con poderes mágicos: gnomos, elfos, duendes, geniecillos y hadas. Un buen número de semejanzas y modos de comportarse sugieren que al menos en algunas de esas historias ciertos personajes parecen modelados según el síndrome de Wil-liams. Se trata de una hipótesis acorde con la idea mantenida por los historiadores según la cual el folclor y la mitología parten de acontecimientos de la vida real.

Los rasgos faciales de los enfermos de Williams se describen a menudo como propios de gnomos o elfos. En común con estos personajes fantásticos del folclor, muchos pacientes tienen una nariz respingona, chata, ojos saltones, orejas ovaladas y boca grande con labios abultados y rematados por una barbilla pequeña. Estos rasgos son, en efecto, frecuentes en los niños con síndrome de Williams que se parecen entre sí más que a sus parientes cercanos, sobre todo en la infancia. El síndrome se acompaña de un crecimiento y desarrollo lento, lo que hace que muchos de los individuos que lo padecen sean de baja estatura.

Los personajes míticos de los cuentos son a menudo músicos y narradores. Las hadas “repiten una y otra vez las canciones que han oído” y pueden “seducir” a los hombres con sus melodías. Cosas parecidas podrían decirse también de los enfermos con el síndrome de Williams, que a pesar de tener cocientes intelectuales típicamente subnormales, poseen unas dotes narrativas fuera de lo común y un gran talento musical. (Las grandes orejas puntiagudas se asocian a menudo con estos personajes míticos y pueden representar de manera simbólica la sensibilidad de estos individuos —en común con los enfermos de Williams— por la música y por los sonidos en general.)

Como grupo, los enfermos con síndrome de Williams son gente cariñosa, que inspiran confianza, llenos de ternura y muy sensibles hacia los sentimientos de quienes les rodean. De manera semejante, las hadas aparecen frecuentemente como “madrinas”, muy amables y llenas de gentileza. Por último, los enfermos de Williams, de manera similar a los personajes de las leyendas, esperan orden y previsibilidad. En los individuos afectados por este síndrome tal necesidad se manifiesta en su fidelidad a las rutinas cotidianas y una constante urgencia por prever y despejar cualquier eventualidad.

En el pasado, los escritores tejieron historias con personajes imaginarios para ayudar a explicar fenómenos que no entendían, incluyendo tal vez los rasgos distintivos, físicos y de comportamiento, de los enfermos con síndrome de Williams. Hoy día, los científicos dirigen su atención hacía estos enfermos en un intento de comprender lo desconocido, con la esperanza de descifrar algunos de los secretos del funcionamiento del cerebro. *—H.M.L.*



NIÑOS DE FAMILIAS DISTINTAS con los típicos rasgos faciales de un elfo que los clínicos asocian con el síndrome de Williams. El dibujo del elfo que aparece a la derecha es obra de Richard Doyle del siglo XIX, un tío del creador de Sherlock Holmes.

Los estudios neurológicos aportan nuevas luces

El examen de los cerebros mediante resonancia magnética y los estudios anatomopatológicos que se llevan a cabo en el Instituto Salk apoyan la probabilidad de que la deleción cromosómica responsable del síndrome de Williams altere el cerebro de una manera más complicada. La deleción parece producir cambios anatómicos (acumulaciones anormales de neuronas en las áreas visuales) que alteran la capacidad de percepción espacial. Pero el defecto cromosómico parece no afectar a la red que abarca estructuras de los lóbulos frontales, lóbulo temporal y cerebelo. Esta red conservada puede hacer función de andamiaje neuroanatómico para las capacidades excelentes e inesperadas de los enfermos de Williams.

Para concretar más, los estudios neuroanatómicos indican que el volumen cortical medio en individuos afectados por los síndromes de Williams o de Down es menor que el de los sujetos normales de la misma edad. Pero los volúmenes de las distintas regiones difieren en aquéllos. Así, los lóbulos frontales y la región límbica de los lóbulos temporales están mejor conservados en los pacientes con síndrome de Williams. El sistema límbico, que también incluye otras estructuras, interviene en las actividades cerebrales relacionadas con la memoria y las emociones; la conservación de la región límbica podría explicar por qué los enfermos de Williams son bastante emotivos y manifiestan una notable empatía.

El análisis del cerebelo pone al descubierto otras diferencias entre enfermos de Williams y de Down. Mientras que el volumen del cerebelo es pequeño en los enfermos de Down, en los de Williams es normal. Y en éstos el neocerebelo, desde el punto de vista evolutivo la región más joven del cerebelo, es igual o mayor que el de los individuos coetáneos del resto de la población, mientras que en los enfermos de Down es menor.

El descubrimiento de que el neocerebelo está conservado en los enfermos de Williams es aún más curioso cuando se contempla dentro del contexto de otras investigaciones. Hasta fechas recientes se admitía que el cerebelo estaba asociado sobre todo con el movimiento. El equipo encabezado por Steven E. Petersen, de la Universidad de Washington, ha demostrado que el neocerebelo se activa cuando uno intenta pensar en una asociación de un verbo con un determinado nombre sustantivo (como “sentarse” con “silla”). Y no sólo eso, sino que cuando se realizan pruebas en pacientes con lesiones cerebelares se ponen de manifiesto alteraciones de las funciones cognitivas, además de las motoras. Los anatomistas se-

ñalan que el neocerebelo comunica con una parte de la corteza frontal que, en común con el neocerebelo, es mayor en el hombre que en los antropoides.

Dado que el hombre habla y el antropoide no, algunos han propuesto que el neocerebelo y la región vinculada de la corteza frontal podrían estar bajo el control de los mismos genes, lo que permitió que surgieran juntos en la evolución sirviendo de apoyo al lenguaje emergente. La conservación relativa de la corteza frontal y el aumento de tamaño del neocerebelo en los pacientes de Williams, junto con la fluidez de lenguaje, presta cierta credibilidad a esta última hipótesis y a la de que el cerebelo interviene en la elaboración del lenguaje hablado.

Otros análisis anatómicos recientes han identificado rasgos adicionales que podrían explicar el más que mediano talento musical de los enfermos con síndrome de Williams. La corteza auditiva primaria (localizada en el lóbulo temporal) y una región auditiva adyacente, el planum temporale (importante para el lenguaje y el sentido musical), tienen un tamaño agrandado en los escasos cerebros de enfermos de Williams estudiados hasta la fecha. Además, el planum temporale es más amplio en el hemisferio izquierdo que en el derecho, aunque en algunos enfermos de Williams la región izquierda tiene un tamaño grande, una característica frecuente entre los músicos profesionales. Estos hallazgos casan bien con las observaciones de Audrey Don, de la Universidad de Windsor, la investigadora que inició los estudios sobre la capacidad musical de los pacientes con síndrome de Williams. Llega a la conclusión de que la percepción intacta de los patrones auditivos puede explicar en gran medida la facilidad para la música y la expresión oral que se observan en los pacientes con síndrome de Williams; en coherencia con este resultado, las estructuras cerebrales deben estar también intactas.

Las sondas fisiológicas que permiten comparar la actividad eléctrica en el cerebro de pacientes de Williams y otros individuos durante la realización de determinadas tareas nos ayudan a avanzar en el conocimiento del desarrollo del cerebro. En respuesta a los estímulos gramaticales, por ejemplo, los individuos normales muestran una mayor actividad en el hemisferio izquierdo que en el derecho, como cabe esperar de una tarea relacionada con el lenguaje. Pero los enfermos de Williams muestran respuestas simétricas en los dos hemisferios, una señal de que no se ha producido la especialización típica relacionada con el lenguaje que tiene lugar en el hemisferio izquierdo. Además, mientras que en un adulto normal hay por lo general una mayor actividad en el hemisferio derecho que en el izquierdo cuando se procesan imágenes de rostros, en los pacientes con síndrome de Williams se da el patrón opuesto. Estas observaciones respaldan la tesis según la cual cuando algo chirría en los procesos de desarrollo, el cerebro acostumbra repartir las responsabilidades, generando nuevos circuitos que desempeñen las funciones de los que se han estropeado.

Las investigaciones sobre el síndrome de Williams acaban de despegar y ya comienzan a arrojar una luz nueva sobre la organización del cerebro. Están consiguiendo también que los científicos se acerquen al “retardado mental” con una visión renovada. Los estudios sobre el síndrome de Williams han demostrado que un cociente intelectual bajo puede enmascarar la existencia de capacidades insospechadas. Y advierten también que otros grupos de personas etiquetadas como retrasados mentales podrían encerrar un potencial inexplorado que aguarda para manifestarse a que los expertos y la misma sociedad se tomen la molestia de buscarlo y cultivarlo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HEMIZYGOSITY AT THE ELASTIN LOCUS IN A DEVELOPMENTAL DISORDER: WILLIAMS SYNDROME. A. K. Ewart y cols. en *Nature Genetics*. vol. 5, págs 11-16; 1993.

COGNITIVE AND NEURAL DEVELOPMENT: CLUES FROM GENETICALLY BASED SYNDROMES. U. Bellugi, E. S. Klima y P. P. Wang en *The Lifespan Development of Individuals: Behavioral, Neurobiological, and Psychosocial Perspectives: A Synthesis.* Nobel Symposium. Dirigido por D. Magnusson. Cambridge University Press, 1996.

REAL-WORLD SOURCE FOR THE “LITTLE PEOPLE”: THE RELATIONSHIP OF FAIRIES TO INDIVIDUALS WITH WILLIAMS SYNDROME. Howard M. Lenhoff en *Nursery Realms: Children in the Worlds of Science Fiction, Fantasy and Horror*. Dirigido por Gary Westfahl y George Slusser. Universidad de Georgia (en prensa).

PERFILES

Marguerite Holloway

TIM BERNERS-LEE: Dar forma a la Red

De pronto, Tim Berners-Lee, puro nervio, se va rodando en su sillón desde la mesa central de su sobrio despacho hasta un rincón donde se encuentran dos enormes pantallas de ordenador. Empieza a teclear a la misma velocidad que habla: escuchándolo, diríase una granizada. El inventor del *World Wide Web* (la Red, esa telaraña mundial de ordenadores) va a explicarnos su idea tal como la concibió, y, por extensión, por qué no se han cumplido las esperanzas que había depositado.

En un santiamén despliega su programa original para componer una página inicial, establecer enlaces con nuevas páginas y pasarse de una a otra. Muestra lo fácil que debería ser insertar conexiones con otros puestos de la Red, y cómo cualquier usuario debería poder introducir comentarios en un documento cual si estuviera escribiendo en el margen de un libro, sólo que en este caso la nota podría transportar la versión electrónica de la página considerada. "Iba a ser un medio muy interactivo; ésa era la idea. Pero no ha salido así", se lamenta.

El disgusto dura sólo un segundo, y el cerebro de alta velocidad, desatado y superhiperenlazado de Berners-Lee —la Red original en sí misma— vuelve a los pensamientos de lo que será su creatura. Habla casi con reverencia. A pesar de todas las entrevistas a las que se presta este personaje de apariencia tímida, a pesar de las veces que le piden que dé una conferencia sobre su "visión", a pesar de sus esfuerzos por hablar despacio, llega un punto en el que este físico británico de 42 años no puede contener su entusiasmo. En su mundo, la Red puede dar alas a la gente y transformar la sociedad al permitir que cada uno se exprese y acceda a toda la información. "La Red puede ayudar a la gente a entender la manera en que los demás viven, aman, son humanos, a entender la humanidad de la gente", martillea a trompicones.

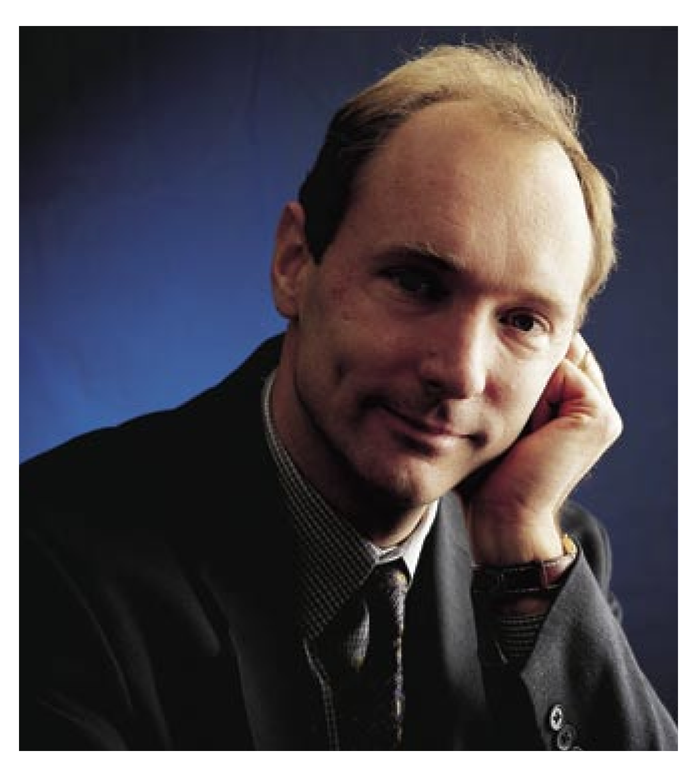
Berners-Lee dirige la evolución de su fantasía electrónica desde un conglomerado de silenciosos y grises despachos de un edificio anodino en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Desde allí Berners-Lee preside el World Wide Web Consortium, conocido por las siglas W3C. Tiene en plantilla unas 40 personas, dispersas por todo el mundo, y 217 miembros, entre los que se cuentan compañías informáticas y de comunicaciones que compiten con denuedo. Su tarea: establecer la normativa de la Red. Al igual que la Internet Society establece protocolos de modo que Internet mantenga su carácter, el W3C intenta asegurar que con independencia del devenir de los desarrollos comerciales, todas las hebras de la Red se mantengan dentro del mismo tejido.

Nadie diría que Berners-Lee, con sus ademanes modestos, fuera la persona a propósito para conseguir que dos matones enzarzados en un duelo (Microsoft y Netscape) se sienten al menos en la misma mesa, aunque no hagan las paces. Pero todos y cada uno de los asuntos que salen a relucir en la Red y su entorno —desde la velocidad con la que las redes transmiten información hasta cómo luchar contra la pornografía digital, pasando por la amenaza de la censura y los retos de la seguridad del comercio digital— son abordados y tratados, desde la sombra muchas veces, por Berners-Lee.

Resulta bastante difícil adentrarse en los orígenes del humanismo universal que profesa Berners-Lee. Protege su vida privada con la tenacidad con que vigila la integridad de la Red. Rehusa responder a las preguntas sobre su mujer o sus dos niños, aunque la única decoración de su despacho es una fotografía con los dos chicos a remolque.

Timothy Berners-Lee nació y se crió en Londres. Sus padres, Conway y Mary Berners-Lee, son matemáticos. Ambos trabajaron en el primer ordenador comercial de Inglaterra (el Ferranti Mark 1) en los años cincuenta. Los Berners-Lee de vez en cuando hablaban de números complejos en la mesa; de niño, Tim se valió de cajas de cartón para construir una réplica del Ferranti, con su reloj, sus tarjetas perforadas y todo. Según uno de sus antiguos colegas, la familia era respetuosa con las arañas: Mary Berners-Lee colgaba hilos de algodón de la bañera para que las arañas que cayeran pudieran trepar y salir de ella.

Acabó física teórica en 1976 en el Colegio Queen



Despreciando las riquezas, Berners-Lee ha escogido proteger la integridad de la Red

de Oxford, con las mejores notas. En 1980, tras trabajar componiendo programas de ordenador en diferentes empleos, pasó seis meses en el CERN, el centro de investigaciones nucleares cercano a Ginebra, donde diseñó un calendario informático llamado Enquire que le ayudaba a seguir el rastro de sus propias asociaciones esporádicas. Que luego sería el germen de la Red. Volvió al CERN en 1984 en calidad de ingeniero de programación.

El resto es la historia antigua de la Red. Berners-Lee quería crear un medio para que los investigadores, alejados entre sí, compartieran sus datos y pudieran trabajar juntos fácilmente. De este modo, creó en 1990 las especificaciones del HTML (el lenguaje de marcas de hipertexto), del HTTP (protocolo de transferencia de hipertexto) y el precursor del URL (localizador uniforme de recursos). La idea del hipertexto había ido rondando desde hacía mucho tiempo. Ya en 1945 Vannevar Bush describía la máquina Memex, un sistema basado en los microfilmes que podía enlazar información o ideas asociadas a través de "rastros". Luego, en 1965, Theodor H. Nelson, que escribía y diseñaba programas, acuñó el término "hipertexto". Pero nadie lo había hecho realidad. "En la industria, llevábamos hablando de cosas del estilo de la Red durante 20 años", señala Eric Schmidt, de Novell. "¿Por qué no lo inventamos?".

La respuesta puede encontrarse al hilo del discurso de Berners-Lee. "Habla con hiperenlaces", señala su colega del W3C Sally Khudairi, otro de palabra apasionada. Tiene siempre a mano una caja de aspirinas para los días en los que no puede seguir el ritmo de su jefe.

Berners-Lee y su compatriota del CERN Robert Cailliau dejaron su programa en Internet en 1991. No se popularizó hasta 1993, cuando Marc Andreessen y sus colegas de la Universidad de Illinois, que habían visto uno de los primeros navegadores de la Red (el ViolaWWW), escribieron el ahora famoso Mosaic. Entre 1991 y 1994 el número de clientes de *Web* pasó de 10 a 100.000. En tanto que organización investigadora, el CERN no era el lugar adecuado para una empresa tan dinámica. "La gente empezó a decir —Mira, esta cosa se está haciendo tan grande que nuestra compañía se está orientando totalmente en torno a la Red. Queremos estar seguros de que va a ser estable—. Querían estar seguros de que hubiera algo que la mantuviera unida", rememora Berners-Lee, explicando el nacimiento del W3C, apoyándose en gestos expansivos que revelan su irrefrenable energía: cruzando los brazos rápidamente, bajando de pronto su sillón, la mano en la barbilla por un momento, una corta risa.

Aunque sea el centro neurálgico de la Red, en las oficinas del W3C reina un silencio monacal. Los pasillos enmoquetados están vacíos; las puertas, cerradas. Los empleados viven en el ordenador, el teléfono o la carretera, trabajando sin horarios para dotar a la Red de cualquier estandardización técnica, criterio de civismo o norma ética que se preconice.



La plantilla del W3C garantiza que la Red conserve su carácter

Cada compañía perteneciente al W3C firma un contrato reservándole a Berners-Lee la última palabra sobre las especificaciones de la Red. Sin embargo, en los tres años transcurridos desde la fundación del W3C Berners-Lee nunca ha decretado nada de forma unilateral. "Tim no trabaja de esa manera", dice Carl Cargill, de Netscape. "Ordena con sus ideas. Y si no estás de acuerdo con ellas, habla y habla contigo hasta que él está de acuerdo con las tuyas o tú con las suyas, o entre los dos se llegue a una idea nueva". Este proceso es crucial porque el W3C existe gracias al consenso.

Parte del objetivo de "interoperabilidad" que se ha marcado Berners-Lee es asegurar que cada usuario y creador de la Red pueda experimentar exactamente lo mismo. Interoperabilidad significa que la Red tiene que ser un sistema en el que cada uno, con independencia de su equipo o de sus programas, pueda participar en términos de igualdad.

"Es importante darse cuenta de que la Red es lo que nosotros hagamos de ella. 'Nosotros', quiere decir las personas que leemos, las personas que enseñamos a los niños a navegar por la Red, las personas que ponemos información allí. En particular, las personas que establecen enlaces", continúa Berners-Lee, cada vez más rápido, igual que siempre que habla de los fundamentos filosóficos de su invento. "Se debe escribir y leer sobre aquello en lo que se cree. Y si uno obra así, entonces la Red resultará valiosa. Si otra gente lee eso, las ideas propias se difundirán. Si alguien está preocupado de que sus niños vayan a leer información de baja calidad, que les enseñe. Que les enseñe lo que hay que leer. Que les enseñe a cribar la información."

Obtener directamente de Berners-Lee una panorámica de sus ideas es una oportunidad que se hace cada vez más rara conforme crece el W3C. A los miembros del equipo W3C, por muy administradores de pata negra que sean, puede resultarles difícil expresar claramente cómo debe procederse en un asunto o cómo responder a una crisis con una compañía. Las ideas pueden asimismo erosionarse bajo la influencia de constantes conversaciones con los ingenieros y los ejecutivos de las empresas, cuyos intereses recaen exclusivamente en los códigos o en el mercado. Hablando del W3C dice Dan Connolly: "Nosotros, los de la plantilla, de verdad necesitamos de él para que nos transmita sus ideas. Me parece que algunos días es importante recordar esto: ¿Debo hacer lo que quieren las empresas o lo que es bueno para la Red?". Connolly añade que algunos miembros del equipo desearían que Berners-Lee fuera más "audaz y expeditivo" para que el W3C pudiera cumplir su misión ("desarrollar todo el potencial de la Red") sin tanto tira y afloja con las empresas.

Eso, Connolly lo sabe, no va a suceder. Berners-Lee podría haberse enriquecido empleando sus habilidades en el sector privado; podría dirigir el W3C con mano de hierro; podría amoldar sus ideas bajo el peso del mercantilismo. Pero entonces no sería el hombre que inventó la Red.

Aunque no tiene ni tiempo para navegar por la Red ni sitios favoritos, Berners-Lee dice que sí la usa para mandar regalos. En Navidad encargó una caja de botellas de vino para sus padres, con la esperanza de que se las llevara el supermercado británico más próximo, tal como se explicaba en una página de la Red. "Acabaron llevándoselas por taxi —debió de costarles una fortuna— desde el otro extremo del país".

Páramo andino

Ecología de los líquenes errantes

Los altos Andes de Venezuela están ocupados por el páramo, una formación vegetal con plantas arrosetadas llamadas frailejones. Las rosetas van escaseando conforme ascendemos. Por encima de los 4000 metros ceden el terreno gradualmente al desierto periglacial, un bioma con pocas plantas vasculares afectado por intenso congelamiento nocturno del suelo. En ese yermo medran líquenes y otras criptógamas, cuya ecología es aún poco conocida.

La mayoría de las criptógamas crecen adheridas a un sustrato estable. Algunas permanecen sueltas, independientes de todo sustrato. Las hay también que acarrean su propio suelo; estas plantas errantes, al no estar ancladas, son transportadas por diversos agentes.

La criptógama errante más común es *Thamnolia vermicularis*, un liquen fruticoso de distribución cosmopolita. Posee talos blancos, finos y alargados. Se le ve en suelos afectados por hielo acicular (cristales en forma de aguja que crecen durante la noche sobre suelos húmedos). *Thamnolia* se reproduce sólo por fragmentación, lo que explica la importancia de los factores ambientales que ayudan a su dispersión. En Venezuela, el viento y el hielo edáfico concentran los líquenes en las depresiones del suelo, incluidas las generadas por vehículos de todo terreno. Los campesinos del páramo usan a veces el *Thamnolia* como depurativo medicinal.

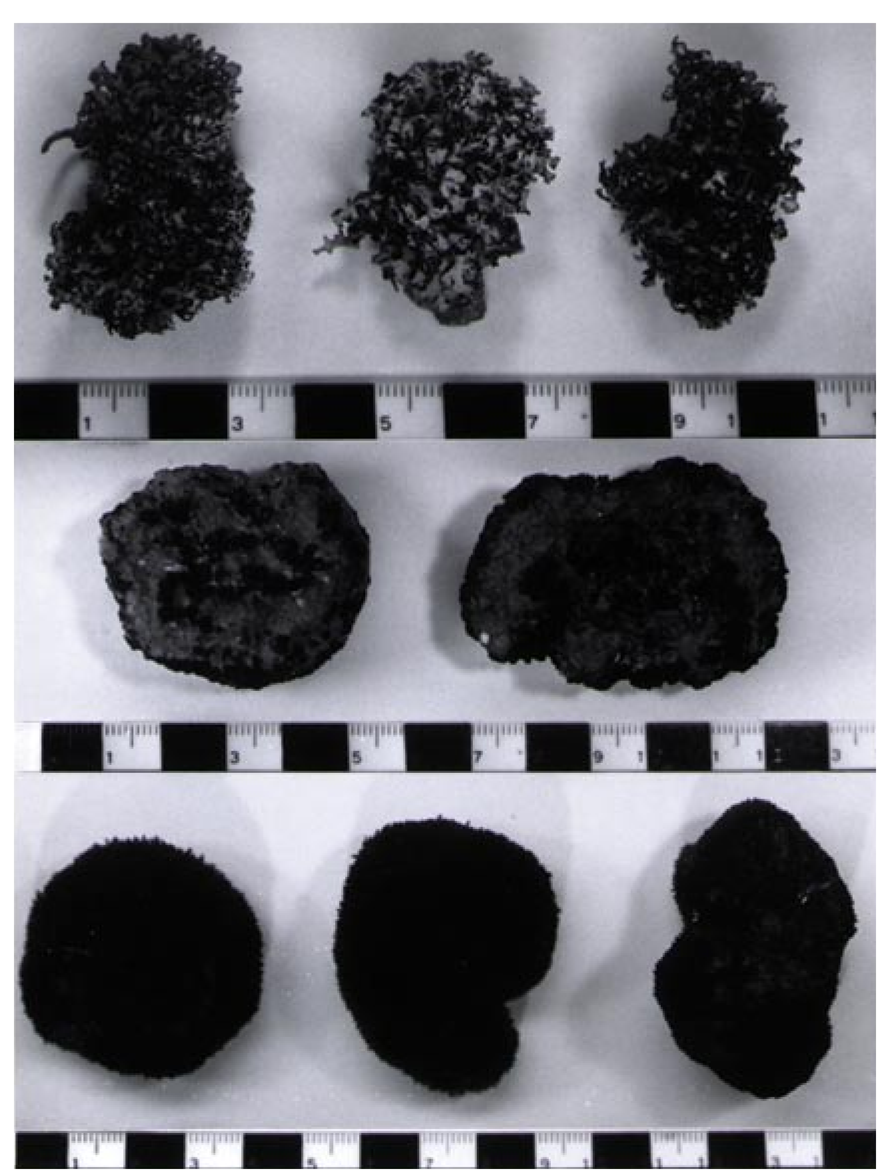
Xanthoparmelia vagans es un liquen migratorio menos común, descubierto en 1802 por Alexander von Humboldt en los páramos ecuatorianos del volcán Chimborazo. Andando el tiempo se le halló también en otras regiones de América del Sur y del Norte. Pero hasta 1992 no se colectaron más ejemplares en los páramos andinos. Su constante movimiento le permite crecer uniformemente en todas direcciones, y así produce pequeños esferoides de hasta 60 milímetros y cinco gramos. Grandes cantidades de globoides se acumulan en áreas donde la acción continua del hielo produce una superficie del suelo corrugada, con pequeños montículos de 2 a 5 centímetros de altura. En zonas lisas, basta una suave brisa de 0,7 a 4,8 metros por segundo para movilizar los líquenes; ahora bien cuando el aire llega a un área con montículos de suelo, quedan atrapados en las depresiones entre domos, de las que sólo pueden salir con vientos 40 a 50 % más fuertes que los que los



Vista general del desierto periglacial, a 4460 m de altitud, en el Páramo de Piedras Blancas. El suelo de la parte frontal de la foto está cubierto por redes escogidas de guijarros, formadas por la acción nocturna del hielo acicular. La escasa cobertura de plantas vasculares se limita a unos pocos ejemplares de Hinterhubera imbricata*, que muestran un crecimiento en forma circular alrededor de piedras aisladas. La pendiente en la parte media está ocupada por frailejones columnares (*Coespeletia timotensis*). Al fondo se divisa el pico Los Nevados (4685 m). Enero de 1992*



Especímenes de Thamnolia vermicularis*, un líquen errante común en el páramo andino venezolano. Cada división de la escala mide 1 cm.*

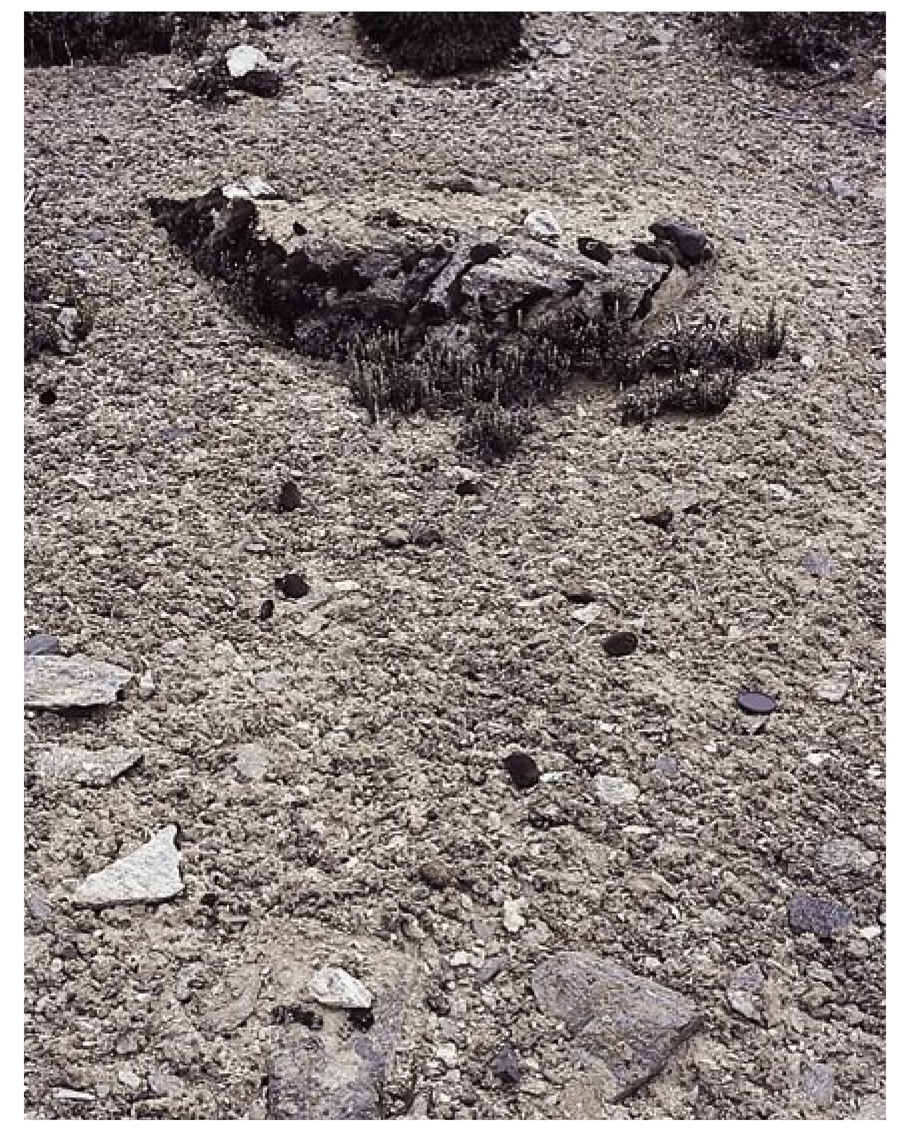


Ejemplares de varias criptógamas errantes del páramo de Piedras Blancas. Las escalas, en centímetros y milímetros, corresponden a los especímenes mostrados. En la fila superior distinguimos líquenes de Xanthoparmelia vagans*. El liquen de la izquierda está en proceso de fragmentación por su área central. El espécimen del centro está aferrado a un pequeño guijarro (*visible en la parte inferior del liquen*). En la fila central se observan esferoides de suelo fino (*zonas claras*) parcialmente cubiertos por el liquen* Catapyrenium lachneum (áreas oscuras)*. Los puntos blancos son pequeñas partículas de cuarzo. En la fila inferior aparecen esferoides errantes de suelo fino cubiertos por* Grimmia longirostris*, un musgo. El ejemplar de la derecha tiene una pequeña área clara tubular donde se encontraba fusionado con un liquen de* Thamnolia vermicularis

depositaron. Cuando los globoides crecen y pesan demasiado, o si se enredan con otros líquenes, tienden a moverse menos, y se tornan más aplanados y lenticulares, ya que sólo realizan la fotosíntesis por su cara superior. Los líquenes mayores y planos acaban por fragmentarse; sus trozos, acarreados por el viento, colonizan nuevos lugares.

El liquen *Catapyrenium lachneum* y el musgo *Grimmia longirostris* forman una capa sobre esferoides de suelo de hasta 8 o 10 centímetros y 35 gramos. En el páramo *Catapyrenium* desarrolla costras microbióticas con otros líquenes, algas, cianobacterias, musgos y hepáticas. En los suelos de muchos desiertos cálidos crecen costras criptogámicas similares, pero se desconocía su existencia en alta montaña hasta su reciente descubrimiento en los Andes venezolanos. Los globoides errantes de *Catapyrenium* se generan porque este liquen sobrevive y sigue creciendo sobre pedazos de suelo arrancados por agujas de hielo u otros agentes erosivos. Normalmente, el musgo *G. longirostris* teje almohadillas sobre rocas o el suelo, pero a menudo los cojines se separan de su sustrato debido a extrema desecación, hielo acicular o perturbación por conejos (*Sylvilagus brasiliensis*), que se alimentan de los musgos.

Los esferoides de *Catapyrenium* y *Grimmia* crecen mientras emigran. Incorporan partículas minerales provenientes del suelo y de la intercepción



Afloramiento granítico en una pendiente a 4480 metros de altitud, en el páramo de Piedras Blancas. Sobre la roca crecen varios cojines del musgo Grimmia longirostris. *En el área debajo de la piedra se distinguen 9 o 10 esferoides errantes de musgos, que se han desprendido de la roca y rodado colina abajo. La pendiente está cubierta por pequeños montículos de suelo, formados por acción repetida del hielo acicular*

aérea de material eólico. La captura de suelo es selectiva, pues sólo las partículas finas (arenilla, limo y arcilla) se integran en los globoides. Esta selectividad se debe a que las aperturas entre los talos del liquen o los tallos del musgo miden, en promedio, de 400 a 500 micras. Por tanto, sólo pueden penetrar en el interior del esferoide los granos de menores dimensiones. Las criptógamas grandes contienen entre 36 y 70 % de partículas de menos de 50 micras (limo y arcilla), mientras que el suelo del páramo tiene sólo de 21 a 27 %. Esto, unido a la acumulación de materia orgánica en los globoides (14 a 19 % frente a 3,8 a 4 % en el suelo), hace que las criptógamas errantes puedan almacenar mucha más agua (74-111 %) cuando están saturadas que el suelo normal (29-33 %); esta capacidad resulta beneficiosa para los vegetales, que así alargan el período durante el cual pueden mantener una condición de fotosíntesis neta.

Los globoides con suelo, muy pesados para dejarse llevar por el viento, se mueven por el hielo acicular y las aguas de escorrentía. Es común ver en las pendientes, por debajo de rocas con cojines de *Grimmia*, especímenes errantes que se forman paulatinamente de fragmentos de musgo que ruedan colina abajo. A medida que crecen, los esferoides de *Grimmia* y *Catapyrenium* también se vuelven sedentarios; entonces se achatan y se rompen en pedazos.

El hielo acicular cumple otro papel primordial en la ecología de las criptógamas errantes. Durante la noche, el agua asciende desde el subsuelo hasta la superficie en virtud del gradiente capilar generado por la congelación de la película superficial del suelo. Cuando el hielo se derrite en la mañana, forma una capa superficial de suelo saturado. Igual que otros líquenes y musgos, los del páramo absorben esta agua al instante y alcanzan su punto de saturación en apenas dos o tres minutos. Esta podría ser la razón principal por la que las criptógamas migratorias de los Andes prefieren terrenos donde se forma hielo acicular; cabe pensar que las plantas dependen de este afloramiento nocturno de agua para su crecimiento.

Queda mucho por aprender sobre la ecología de estos peculiares organismos, pero está claro que las criptógamas errantes del páramo venezolano se han adaptado a las inhóspitas condiciones de las altas cimas andinas, donde otras plantas vasculares no prosperan.

FRANCISCO L. PÉREZ SÁNCHEZ
Departamento de Geografía
de la Universidad de Texas,
Austin

Mecenazgo

E investigación

No va acompasada en España, se dice con razón, la investigación y la industria. O lo que es lo mismo: las empresas carecen de laboratorios de investigación en el sentido más exigente del término. A ello se atribuye parte de los males que afligen a la economía nacional, el de la dependencia exterior primerísimamente.

Sin embargo, hay muchas formas de fomentar la investigación. El mecenazgo no es la más desdeñable. Y en ese punto se están dado pasos importantes. Es el caso del “Programa Iberdrola de Ciencia y Tecnología”. Iberdrola es la mayor empresa privada española de producción de electricidad, con una producción de 42 gigakilowatts-hora en 1994. El proyecto en

cuestión cubre tres áreas: un premio, un programa de profesores visitantes y un centro de física de verano.

El premio, anual, se entrega a un científico que haya realizado su labor predominantemente en España y que trabaje en matemática, física, química o ingeniería. Un jurado internacional vela por la objetividad de la concesión. El programa de profesores visitantes selecciona varios grupos de investigación españoles y les concede la subvención que precisan para que inviten hasta cuatro expertos extranjeros que, durante 18 meses, puedan trabajar con ellos. Por último, el Centro de Física de Benasque reúne cada verano un plantel escogido de físicos teóricos que debaten en torno a desarrollos o hipótesis recientes. De proyección internacional en sus asistentes y conferenciantes, la última reunión, por ejemplo, se dedicó a métodos avanzados en física de materia condensada y en teoría cuántica de campos.



Yacimiento de Elisabethfeld, situado en pleno desierto del Namib, Namibia. El lugar donde fueron hallados los restos de Namibiomeryx senuti *está marcado por la columna de piedras. En la foto, tomada el día 8 de junio de 1994, Dolores Soria* (de rojo) *y Martin Pickford* (de gris) *están prospectando la localidad en plena tormenta de arena*

Paleontología

Bóvidos de Namibia

En la naturaleza la familia Bovidae (antílopes, cabras, vacas, búfalos, buey almizclero y otros) ocupa un lugar prominente. De hecho, entre las familias de grandes mamíferos, es la más diversificada, con más de 120 especies distribuidas en Eurasia, Africa y América del Norte.

Los representantes fósiles más antiguos conocidos proceden de sedimentos de Europa, Asia y Africa del final del Mioceno inferior, cuyo origen se remonta unos 17 millones de años. Más obscuros resultan los precursores de la familia y el área donde se habría producido la transición entre los rumiantes ancestrales y los bóvidos.

Hasta la fecha, numerosos autores habían postulado un origen africano para esta familia. No aportaban, sin embargo, pruebas que avalasen tal hipótesis. Se fundaban exclusivamente en su brusca aparición en el registro fósil europeo, lo que implicaba la inmigración desde un área desconocida. Por lo demás, no se trataba de un problema reservado a los bóvidos. Lo mismo cabía predicar del resto de las familias de rumiantes con apéndices frontales.

Se aceptaba que la aparición de estructuras o apéndices craneales hubo de producirse sólo una vez en el curso de la evolución de los rumiantes. Dicho de otro modo: los actuales Cérvidos, Jiráfidos, Bóvidos, Antilocápridos y las familias extinguidas de Palaeomerícidos, Dromomerícidos, Climacocerátidos y Lagomerícidos habrían compartido un mismo antecesor, a partir de cuyo apéndice craneal surgirían los osiconos, cuernos y astas que caracterizan a cada una de las familias mencionadas. Esta opinión todavía la siguen admitiendo algunos autores.

Pero la tendencia mayoritaria aboga por una aparición independiente de cada tipo de apéndice craneal, lo que implica un origen polifilético para las familias de rumiantes con tales defensas. La tesis ha recibido respaldo por lo que respecta a los cervoideos con apéndices craneales, emparentados con formas sin apéndices craneales del Oligoceno superior



Holotipo de Namibiomeryx senuti*, mandíbula izquierda con la serie molar completa (M3-M1), fotografiada en vista externa. La serie molar mide 26,5 milímetros*

y Mioceno inferior de Europa.

Recientemente un equipo de paleontólogos europeos dirigidos por Martin Pickford, del Colegio de Francia, y en el que han participado Dolores Soria, Manuel Nieto y el autor de esta nota, del Museo Nacional de Ciencias Naturales en Madrid, han descubierto en el yacimiento de Elisabethfeld, Namibia, restos de un microrrumiante de la talla del actual dik-dik (cuyo peso es de 4 a 5 kilogramos) que vienen a arrojar nueva luz sobre el origen de los Bóvidos. El yacimiento, del Mioceno inferior, tiene una antigüedad de 18 a 20 millones de años.

El registro fósil sólo ha aportado restos dentarios y postcraneales. Ningún indicio de presencia de apéndices craneales; cabe, pues, presumir que carecía de ellos. Lo más notable de *Namibiomeryx senuti*, así hemos denominado a la especie, reside en su dentición, que es prácticamente idéntica a la conocida en los primeros bóvidos con apéndices craneales, similitud que se extiende a los restos conocidos del esqueleto postcraneal. Este fósil representa la transición entre los rumiantes prebóvidos y los bóvidos. Constituye, además, un testimonio sólido de que esa transición aconteció en Africa.

A comienzos del Mioceno inferior apareció un movimiento migratorio que entró en Africa. Entre las especies inmigrantes llegaron los antepasados de *Namibiomeryx*, de cuya existencia en Europa hay pruebas. En las nuevas áreas ocupadas de Africa se produjo la diversificación del grupo. Sus descendientes cruzaron más tarde la península arábiga y se propagaron con notable éxito por el Viejo Mundo.

Pero no terminan ahí las enseñanzas que nos ofrecen los nuevos fosiles descubiertos. De su estudio se desprende que la transición de las formas bovoideas sin apéndices craneales a las que los poseen fue coetánea con la transición de las líneas precervoideas a las cervoideas. Con otras palabras: por las mismas fechas y en continentes distintos la mayoría de las líneas de rumiantes carentes de apéndices frontales habrían adquirido, cada una por su cuenta, esas estructuras craneales.

La aparición simultánea (paralela) de los apéndices craneales en las diferentes líneas de rumiantes se ha puesto en correlación con las variaciones del peso corporal, ligado, a su vez, al fuerte aumento del grado de estacionalidad que comienza a detectarse en el planeta durante el Mioceno inferior y medio (hace entre 20 y 16 millones de años antes del presente).

Semejante reacción ante un cambio ambiental vendría urgida por la necesidad de mantener un equilibrio entre el esqueleto óseo y el peso total. En aves y mamíferos el esqueleto óseo representa un 7 % del peso total; se ha comprobado que este equilibrio se ha venido manteniendo desde hace 130 millones de años. Los rumiantes están sometidos a variaciones de peso importantes en función de la alternancia estacional, determinante de la escasez o abundancia de alimento vegetal. La acumulación de materia ósea en el cráneo, en forma de apéndices craneales, sería un mecanismo altamente eficiente para mantener constante la relación entre el peso óseo y el peso corporal en las épocas de engorde.

JORGE MORALES,
Departamento de Paleobiología,
Museo Nacional de Ciencias
Naturales, CSIC,
Madrid

Especiación

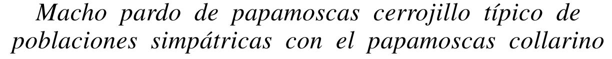
Teoría del refuerzo

Las especies han ido apareciendo en el curso de la evolución. A ese proceso filogenético de formación de especies se le llama especiación. El proceso de especiación implica que poblaciones hasta entonces pertenecientes a una misma especie llega un momento en que no pueden cruzarse con éxito, aun habitando en el mismo lugar. Este aislamiento reproductivo puede explicarse como un subproducto de otros cambios evolutivos.

En 1937 Theodosius Dobzhansky propuso que, si dos poblaciones de la misma especie habían divergido genéticamente hasta el punto de que los descendientes de cruces intrapoblacionales fueran más aptos que los descendientes de cruces entre poblaciones, la selección natural primará el aumento en los cruzamientos entre individuos similares sobre los cruzamientos al azar. Estos cruzamientos entre similares incrementan el aislamiento reproductivo, reduciendo el intercambio de genes entre las dos poblaciones.

Pero este mecanismo de “refuerzo” —así se llama esta forma de instar la especiación— carecía de apoyo em-





Macho pardo de papamoscas cerrojillo típico de poblaciones simpátricas con el papamoscas collarino



Macho negro de papamoscas cerrojillo típico de poblaciones alopátricas

pírico sólido, hasta que el año pasado el grupo encabezado por Glenn-Peter Saetre, de la Universidad de Oslo, aporta una prueba convincente de refuerzo del aislamiento por selección sexual en el grupo de especies de papamoscas europeos del género *Ficedula* (pequeñas aves insectívoras).

Los papamoscas cerrojillo (*F. hypoleuca*) y collarino (*F. albicollis*) cuyos machos tienen un plumaje blanco y negro similar son alopátricos en gran parte de sus áreas de distribución; es decir, habitan en zonas geográficas distintas. Sin embargo, donde sus áreas de distribución se solapan en Europa central y oriental, los machos del cerrojillo son pardos en lugar de negros, y los machos del collarino presentan collares blancos más extensos, notas que facilitan la distinción entre una y otra especie.

En este estudio, Saetre y colaboradores argumentan que esta divergencia de pela en condiciones de simpatría —cuando dos poblaciones ocupan simultáneamente una misma zona— se debe al mecanismo de refuerzo. Lo razonan en cuatro puntos. Primero, los cruzamientos heteroespecíficos —entre especies distintas— observados en la zona de simpatría de la República Checa son más raros de lo esperado. Representan un 2,6 % frente a un esperado 14 %, supuesto éste que se fundaba en la disponibilidad de distintos tipos de individuos. Además, los híbridos tienen una menor aptitud biológica; sólo un 26 % de los huevos de parejas cuyo macho o hembra sea híbrido eclosionan frente a un 95 % de parejas sin híbridos. Sin embargo, los híbridos producen suficientes descendientes a través de cruzamientos con individuos puros para garantizar cierto flujo de genes entre poblaciones; ese flujo significa que el aislamiento genético no es completo, lo que crea una presión selectiva a favor de un mecanismo que favorezca el aislamiento. Sin flujo genético no sería ya necesario el refuerzo.

Segundo, la filogenia —parentesco evolutivo— basada en el ADN mitocondrial indica que el plumaje de las poblaciones alopátricas es el precursor evolutivo de los demás y que las características divergentes de las poblaciones simpátricas de cada especie se han desarrollado por separado en la zona de simpatría. Una prueba de ello es que hay una tercera especie de papamoscas (*F. semitorquata*), habitante de los Balcanes y el Cáucaso, cuya estructura genética difiere bastante de la de los demás. En su aspecto, sin embargo, este papamoscas muestra un estrecho parecido con los cerrojillos alopátricos de una población del Sistema central español.

Tercera razón: las hembras de poblaciones simpátricas escogen para aparearse machos de su misma especie. Opción que se acentúa cuando éstos presentan los caracteres divergentes típicos de poblaciones simpátricas. Para comprobar ese fenómeno se realizaron experimentos de elección por hembras de machos de plumaje teñido en aviarios.

El grupo de Saetre observó, por último, que, cuando pueden elegir entre dos machos de su misma especie, las hembras de poblaciones simpátricas prefieren los machos con coloración típica de poblaciones simpátricas, y dejan de lado a los machos con coloración de poblaciones alopátricas. Aplicado al caso de hembras de papamoscas cerrojillo el resultado provoca sorpresa: su preferencia por machos pardos simpátricos —sobre los machos negros y blancos de poblaciones alopátricas, más llamativos— es justamente la opuesta a la preferencia por machos conspicuos observada en poblaciones alopátricas noruegas y en muchas otras especies. La opción por machos conspicuos es congruente con la selección sexual de machos de superior calidad.

En conclusión, el emparejamiento entre similares y la divergencia de caracteres del plumaje constituyen estrategias adaptativas de estas especies. De los cruzamientos interespecíficos resultan descendientes híbridos de baja aptitud. Según cabría esperar de un pasado de selección en contra de la hibridación, hay en las poblaciones simpátricas una fuerte inclinación a favor de emparejamientos entre individuos de la misma especie.

La conjunción del carácter del plumaje con la preferencia de apareamiento de las hembras explica la menguada producción de híbridos. Y ese fenómeno comprobado avala la existencia de una especiación en curso por medio del refuerzo del aislamiento reproductivo entre papamoscas cerrojillos y collarinos simpátricos. La plausibilidad de la idea de Dobzhansky del refuerzo como mecanismo de especiación sale reforzada por este trabajo de Saetre y colaboradores.

Juan Moreno Klemming
Museo Nacional
de Ciencias Naturales
CSIC

DE CERCA

Texto y fotos: Albert Masó

Mar de escamas

Nos encontramos ante *Papilio indra*, un papiliónido exótico, o lo que es lo mismo, cuyo origen no está en la península Ibérica. Se trata de un lepidóptero, palabra compuesta de dos raíces griegas, la que designa alas (*pteron*) y la que indica escamas (*lepidis*). Ambos aspectos caracterizan al orden de nuestro insecto.

Si pasamos de la definición terminológica a su sentido biológico, advertiremos, en primer lugar, que las escamas le protegen del frío. Las de las alas se intercalan a la manera de tejas en un tejado de pizarra y confieren a la base membranosa la firmeza necesaria para el vuelo.

¿Quién no se ha quedado prendado alguna vez del colorido de una mariposa? Placer estético aparte, el cromatismo ejerce una indudable función selectiva. La tonalidad apagada de algunas especies les permitirá camuflarse y evitar así la detección por sus depredadores. Las que presentan un aspecto muy llamativo están avisando de su potencia tóxica. Algunas se sirven de los colores para comunicarse entre sí. Y aunque se conoce su obvia razón identificadora de los miembros de una misma especie a la hora de reproducirse, esto no ha sido corroborado por la observación de algunas especies de colores brillantes. Investigaciones recientes sugieren que los machos de ciertos licénidos y ninfálidos (mariposas diurnas) de coloraciones muy vivas no favorecen el apareamiento. Ese derroche cromático pudiera indicar a los machos competidores que el territorio está ocupado.

Técnica fotográfica:

Se trata de tres fotomacrografías de estudio realizadas cada una a mayor ratio (relación de reproducción). Para la primera se ha utilizado un objetivo normal de 85 mm de distancia focal (f. 1,8). Dado que enfocando a la mínima distancia sólo se obtenía una ratio R = 1/10, se colocó una lente de aproximación de +3 dioptrías para lograr así una R = 1/3, que es la que necesita esta mariposa de 6 cm de envergadura alar.

La foto superior de la derecha está hecha a tamaño real (R = 1). Para conseguirlo, se dispuso de un objetivo de fotomacrografía de 55 mm (f. 2,8). Como quiera que la ratio máxima que proporciona es de R = 1/2, se intercaló un tubo de extensión de 27,5 mm (su tubo estándar) entre el objetivo y el cuerpo de la cámara. Así se duplicó.

Para la tercera "macro" se utilizó el mismo objetivo anterior, aunque intercalando un fuelle, que se extendió hasta conseguir una R = 3,5. Si para estas dos últimas tomas se hubiese usado el primer objetivo, hubiéramos perdido calidad óptica de las imágenes.



Aumento = 1,2×

Aumento = 5×

Aumento = 20×

Reconstrucción del ataque de un dinosaurio

El trabajo conjunto de un escultor y un paleontólogo permite reconstruir el desarrollo de una escaramuza ocurrida hace 100 millones de años

David A. Thomas y James O. Farlow



1. *ACROCANTHOSAURUS*, un dinosaurio depredador, sigue las huellas de un herbívoro cuadrúpedo (*Pleurocoelus*), extraviado quizá de un rebaño. Estos herbívoros gigantes andaban por las riberas utilizando el mismo patrón de marcha que los actuales mamíferos cuadrúpedos: las dos extremidades de un lado —pie y mano— se levantaban del suelo en el mismo momento.



La paleontología norteamericana, en su búsqueda de fósiles de dinosaurios, cosechó algunos éxitos en vísperas de la Segunda Guerra Mundial. Uno de los yacimientos excavados, pese a no aportar huesos, suministró una valiosísima información. A orillas del río Paluxy, en Texas central, apareció el "rastro" de un dinosaurio, es decir, una colección de huellas o icnitas dejadas en un fango antiguo. Estas impresiones fósiles deben su conservación a los sedimentos que las enterraron y las endurecieron; 100 millones de años después, la erosión nos ha revelado la marcha de estos dinosaurios en lo que ahora es una roca sólida.

Las icnitas encierran un enorme interés para los paleontólogos. Aunque se ha especulado lo indecible sobre el comportamiento de los dinosaurios, la verdad es que sólo las pisadas fósiles aportan una prueba directa de sus movimientos reales. Estudiando las huellas los expertos deducen el tipo de marcha y la postura. En esas improntas se han basado para determinar la rapidez con que caminaban determinadas especies y deducir el deambular gregario de muchos dinosaurios.

Por lo que concierne a las icnitas del río Paluxy, debemos a Roland T. Bird una observación sorprendente. Fue él quien descubrió el yacimiento en

1938 y lo excavó parcialmente en 1940. Antes de rebanar algunas placas con huellas para mandárselas a su superior, Barnum Brown, del Museo Americano de Historia Natural en la ciudad de Nueva York, Bird cartografió y fotografió exhaustivamente las pisadas. Advirtió en seguida que un grupo de icnitas, de un dinosaurio carnívoro bípedo (probablemente un *Acrocanthosaurus*, con peso de dos o tres toneladas), corrían paralelas al rastro dejado por un gran herbívoro cuadrúpedo (parecido al gigantesco *Pleurocoelus*), que debía de ir en rebaño. Más adelante, en un punto concreto, el carnívoro dio un salto extraño y dejó en el barro dos huellas derechas consecutivas.

Bird creía que estos dos grupos de icnitas con un brinco en la zona media eran testimonio del momento en que el carnívoro, menor, atacó al herbívoro, mucho mayor. Los paleontólogos expertos en icnitas de dinosaurios recibieron con cierta sorna esa interpretación novelada. Las cosas han cambiado. Hay ahora quienes opinan que a Bird no le faltó razón. La existencia de una serie de eventos poco probables nos ha permitido reinterpretar ese descubrimiento antañón.

Excavando entre los papeles

Seis años después de la muerte de Bird, en 1984, la Universidad Cristiana de Texas se dispuso a publicar su autobiografía, *Huesos para Barnum Brown*. Entraron en contacto con uno de nosotros (Farlow) para que leyese el manuscrito y actuase como revisor científico. Constituyó una auténtica sorpresa el comprobar que los escritos de Bird remitían a esquemas y a una película de la excavación cuya existencia ignoraban los paleontólogos.

Por entrevistas con la esposa y la hermana de Bird supimos que había acumulado bastante información inédita sobre las icnitas de Paluxy. Su sobrino dio pronto con una lata que escondía la película de la excavación; estaba delicadamente guardada en un refrigerador del sótano. Una caja en el ático de Bird proporcionó asimismo innumerables notas, junto con grandes esquemas de las huellas en cuestión. Los diagramas resultarían a la postre decisivos, pues las huellas se habían deteriorado bastante desde 1940: no sólo faltaban partes del yacimiento (Bird envió fragmentos a Nueva York y al Museo Memorial de Texas en Austin), sino que las inundaciones estacionales del río Paluxy habían erosionado la superficie de la roca y la habían cubierto con una capa de sedimentos.

Para fortuna nuestra, los esquemas y fotografías de Bird mostraban con exquisito pormenor la situación de cada icnita, permitiendo a Farlow estudiar de nuevo el yacimiento. Este trabajo fructificó en una extensa monografía, publicada en 1987. Se documentaba que los dos rastros paralelos representaban un dinosaurio persiguiendo a otro, tal como Bird en un principio había sugerido. Pero la interpretación del extraño salto permaneció abierta a debate en el seno de la comunidad paleontológica. Y en ese momento entra en escena un artista.









2. LOS MAMIFEROS ACTUALES confirman que los depredadores ajustan a menudo su zancada con la de su presa antes del ataque. Justo después de unirse a la caza, la leona del primer plano acompasa su paso a la carrera del búfalo: primero las extremidades posteriores de ambos animales se mueven sincrónicamente hacia adelante (*a*), a continuación las dos anteriores (*b*) y entonces las dos posteriores otra vez (*c*), justo antes de que la leona ataque en la parte posterior del búfalo.

Esculpiendo ciencia

En 1983 la ciudad de Albuquerque encargó a uno de los firmantes (Thomas) la producción de una estatua a tamaño natural de un dinosaurio para el Museo de Historia Natural y Ciencia de Nuevo México. A ese trabajo seguirían dinosaurios en bronce y fibra de vidrio para otros museos del mundo. Para proporcionar a estas creaciones un aspecto real, fue necesario investigar los tipos de marcha en los animales y, en particular, los dinosaurios.

Una primera aproximación al problema nos muestra que los mamíferos cuadrúpedos (pensemos en un elefante) pisan sus propias huellas mientras caminan; ponen el pie en la impresión que la correspondiente mano acaba de dejar libre. Este hecho se debe a que ambas extremidades del

mismo lado del animal permanecen fuera del sustrato al mismo tiempo. Por el contrario, un reptil actual nunca pisa con el pie exactamente donde lo ha hecho previamente la mano. Camina con las extremidades diagonales moviéndose juntas, por lo que el pie de un lado se apoya antes de que la mano de ese lado abandone el sustrato.

Las icnitas de los dinosaurios cuadrúpedos indican que éstos procedían con patrones de marcha similares a los de los mamíferos actuales y distintos de los utilizados por la mayoría de reptiles contemporáneos. Esta asociación se pone de manifiesto en el registro fósil de Paluxy: las huellas de los pies de los dinosaurios herbívoros cuadrúpedos comúnmente se superponen a las de sus manos.

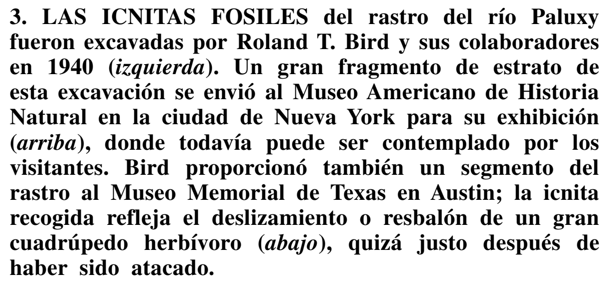
¿Pueden los mamíferos actuales enseñarnos algo sobre estos reptiles extintos que pisaron esa antigua ribera? Con el fin de comprobar la hipótesis de Bird, Thomas estudió la estrategia de caza seguida por los depredadores mamíferos. Los atacantes ajustan la velocidad y dirección de su maniobra antes del ataque. A menudo hacen mucho más. Durante el ataque, el carnívoro ajusta su zancada hasta correr al paso del animal a abatir.

El león, el leopardo o cualquier otro felino acelerará hasta ponerse al ritmo de su objetivo. El depredador cambia entonces la longitud de su zancada para ajustarla con la de su presa. Con ello acompasa su marcha a la de su víctima, que suele ser un animal más voluminoso galopando furiosamente en

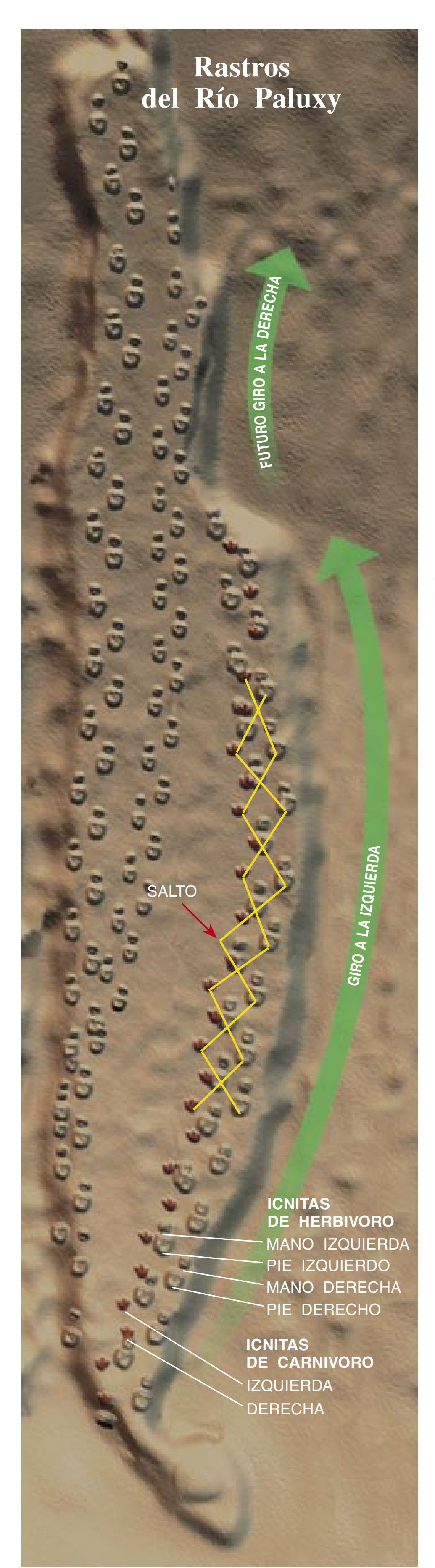


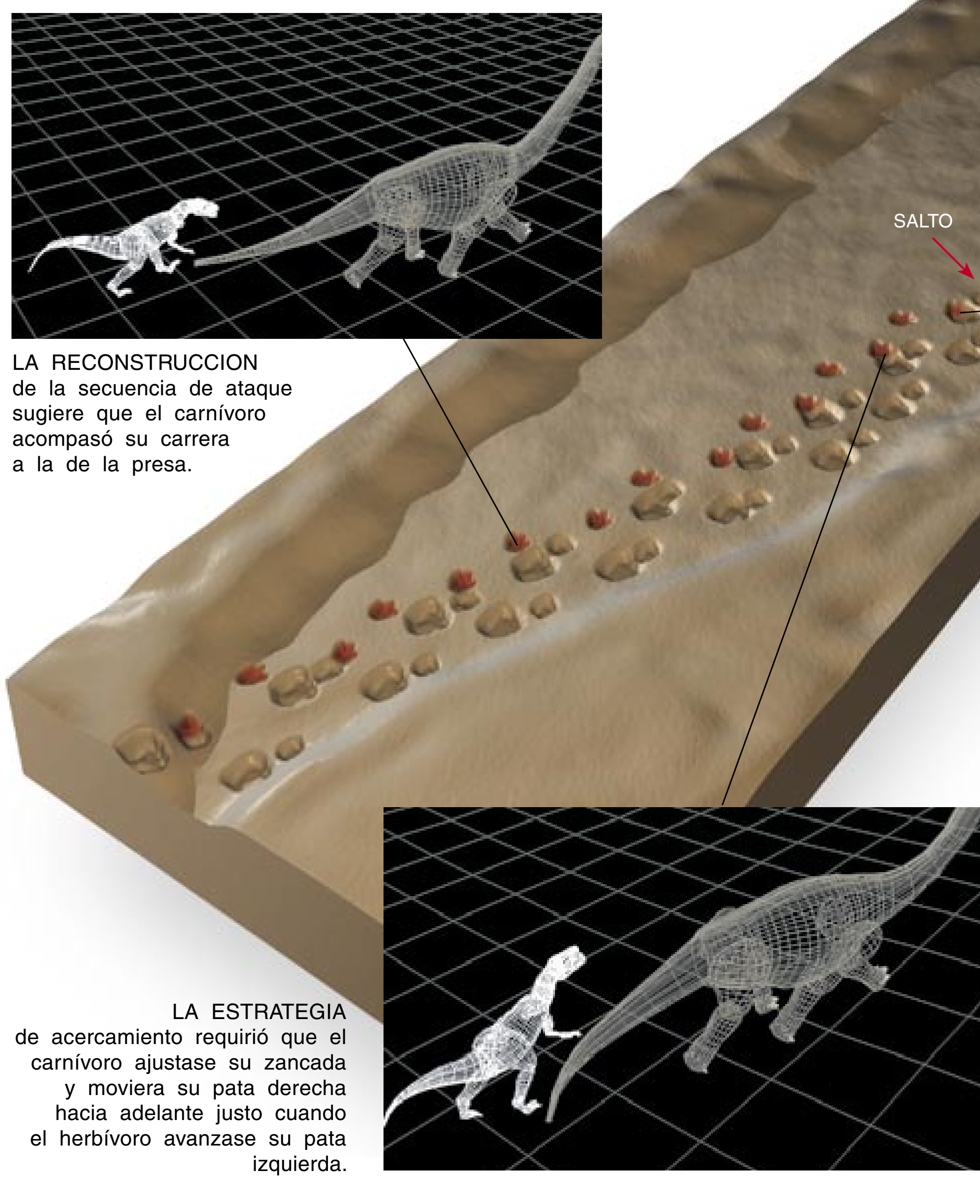






3. LAS ICNITAS FOSILES del rastro del río Paluxy fueron excavadas por Roland T. Bird y sus colaboradores en 1940 (*izquierda*). Un gran fragmento de estrato de esta excavación se envió al Museo Americano de Historia Natural en la ciudad de Nueva York para su exhibición (*arriba*), donde todavía puede ser contemplado por los visitantes. Bird proporcionó también un segmento del rastro al Museo Memorial de Texas en Austin; la icnita recogida refleja el deslizamiento o resbalón de un gran cuadrúpedo herbívoro (*abajo*), quizá justo después de haber sido atacado.





LA RECONSTRUCCION de la secuencia de ataque sugiere que el carnívoro acompasó su carrera a la de la presa.

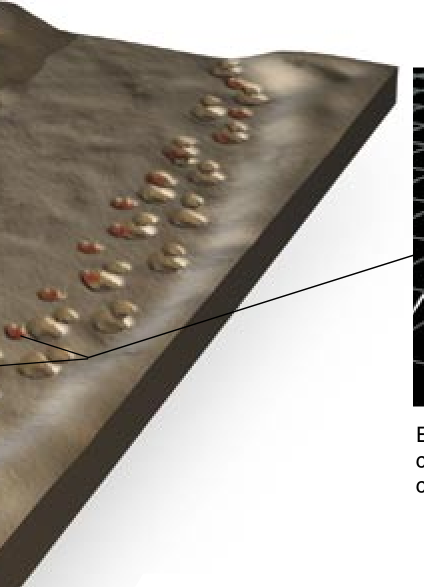
LA ESTRATEGIA de acercamiento requirió que el carnívoro ajustase su zancada y moviera su pata derecha hacia adelante justo cuando el herbívoro avanzase su pata izquierda.

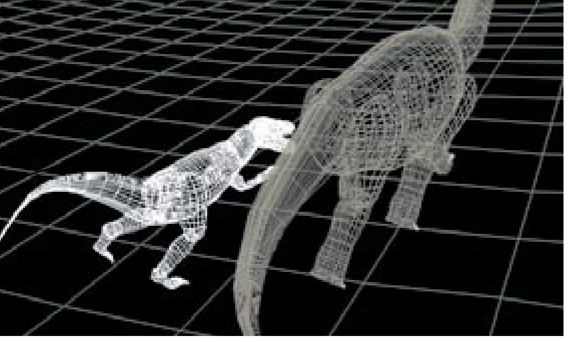
un intento por escapar. Se impone la eliminación del movimiento relativo, si el depredador pretende atacar con seguridad y eficacia en su embestida final.

En un registro informal de varios lances protagonizados por felinos africanos (leones, leopardos, guepardos y hienas), sólo en muy pocos casos el depredador no alcanzó el ritmo de su presa. A veces ello obedecía a que el atacante ejecutaba una repentina emboscada; el factor sorpresa importa entonces muchísimo. En otros casos de excepción, la víctima era pequeña y, grande, el depredador; no era, pues, necesario que éste armonizara su zancada.

Hay que andar con cautela a la hora de recurrir a estas observaciones para interpretar las icnitas de Paluxy. Los mamíferos cuadrúpedos actuales difieren de los dinosaurios, bípedos y cuadrúpedos. Todos los depredadores modernos examinados corren a galope durante la caza, mientras que los dinosaurios carnívoros bípedos caminarían con presteza o irían a

4. EN EL ESQUEMA DE BIRD se ve que las huellas del carnívoro bípedo (*icnitas en rojo*) marchan paralelas a las del herbívoro cuadrúpedo durante su amplio giro a la izquierda. Puestos que sus huellas no cruzan las de los otros rastros existentes, ambos dinosaurios debieron girar a la derecha más allá de la zona excavada. Las pisadas del depredador y de su presa muestran una notable simetría en una docena de pasos (*líneas amarillas*), donde parecen haberse movido en sincronía; salvo en el punto donde el carnívoro saltaría y, por tanto, dejó sin imprimir una huella izquierda (*flecha roja*).





EL SALTO APARENTE (dos icnitas derechas consecutivas) puede marcar el punto del rastro donde el carnívoro atacó a su presa.

una carrera lenta; por su parte, los dinosaurios herbívoros cuadrúpedos seguirían una marcha parecida a la de los mamíferos herbívoros. A pesar de todo, parece que en el Cretácico inferior los depredadores habían aprendido ya las ventajas que proporciona el ajustar el ritmo con el de sus presas.

Un ataque hace 100 millones de años

No es difícil imaginarse dos dinosaurios avanzando por las orillas del río Paluxy; en aquel entonces seguían también el margen de una antigua orilla, y podrían hacerlo separados por muchas horas o incluso días. Pero el análisis atento de los diagramas de Bird revela que la proximidad de los dos rastros quizá no fue mera casualidad.

Amén de discurrir paralelas las dos pistas, el patrón general es muy parecido en ambos casos. Los movimientos de un animal condicionaron los del otro. Y hay más detalles que proporcionan pruebas adicionales de que los dos rastros se produjeron a la vez. Cerca del final de la zona excavada, las icnitas del carnívoro y las del herbívoro tuercen hacia la izquierda. Si el perseguidor hubiera seguido en la misma dirección, sus huellas habrían cruzado las del otro rastro. Pero no lo hacen. Además, ambos animales debieron torcer a la derecha después de dejar el área excavada por Bird. Es decir: ambas trayectorias reflejan movimientos comunes, así como dos amplias curvas. No cabe duda de que los animales tenían algo que ver entre sí.

Lo verosímil es que el carnívoro siguiera al herbívoro. El depredador se aproximó a su presa desde detrás, lentamente al principio, algunos pasos detrás de su víctima. Debería luego avivar su marcha, ajustando su zancada a la de su presa. Que tal sucedió viene avalado por el trecho de icnitas en que los dos trazan un recorrido simétrico. Durante una docena de pasos, el carnívoro pisó con su pie derecho cerca o dentro de la huella producida por el pie izquierdo del herbívoro. Esta pauta era la de esperar en un carnívoro que persiguiera al herbívoro de cerca, sin chocar, justo unos pasos detrás y ligeramente a su izquierda.

El resto de la escena que sugirió Bird —que el carnívoro atacó su presa hacia la mitad del trayecto—, aunque más especulativa, no carece de asidero en la observación. La hipótesis de un ataque de este tipo no sólo explica la misteriosa similitud en el patrón de ambos rastros, sino también en la pérdida de una de las huellas izquierdas, producto del salto realizado por el carnívoro, lo que constituiría una pieza adicional de este rompecabezas, desenterrado hace más de medio siglo.

Las observaciones de Bird revelan que en este momento el pie derecho del herbívoro resbaló, según ha quedado plasmado en la pieza exhibida en el Museo Memorial de Texas. Aparece unos pocos pasos por delante de las dos icnitas, diestras y consecutivas, del carnívoro. El carnívoro saltaría sobre el voluminoso herbívoro, que intentaba escapar, y en esa pugna se deslizaría tambaleante cuando fue herido.

Tanto la marca del resbalón como las dos huellas derechas consecutivas apoyan la idea de que el carnívoro y el herbívoro se movieron juntos por este sustrato, separados escasos pasos. Cabe la posibilidad de que el herbívoro realizase una maniobra defensiva, cargando todo su peso sobre el atacante antes de ser herido, y exagerando el movimiento defensivo girando a la izquierda.

No tenemos certeza de que el ataque y la defensa ocurrieran tal cual. Ignoramos si otros carnívoros se unieron a la persecución o si este herbívoro fue apartado de un rebaño. Son muchos los interrogantes de ese episodio que permanecen bajo tierra. Pero parece no admitir dudas que hace unos 100 millones de años, en un barro limoso de lo que actualmente es Texas, un veloz carnívoro eligió y atacó a un herbívoro pesado. Quizá le faltó suerte a Bird para dar con pruebas de la realidad del incidente. Pero nadie le puede escatimar su acierto en reconocer, documentar y excavar parte del registro de esta antigua cacería en una planicie empapada de agua, ahora convertida en piedra.

DAVID A. THOMAS y JAMES O. FARLOW empezaron a estudiar las huellas de dinosaurios tras seguir ellos caminos muy dispares. Thomas, escultor, realizó la primera reconstrucción en bronce a tamaño natural de un dinosaurio en 1985 para el Museo de Historia Natural y Ciencia de Nuevo México en Albuquerque. Otras creaciones saurias de Thomas se exhiben en el Museo Anniston de Historia Natural de Alabama, el Colegio del Museo del Este de Utah y el Museo Nacional de Historia Natural de Taiwan. Farlow, paleontólogo de profesión, se doctoró por la Universidad de Yale en 1980. Ahora enseña geología en la Universidad de Indiana-Purdue en Fort Wayne, donde investiga huellas de dinosaurios y biología de los mamíferos de la Edad del Hielo del medio-oeste de los Estados Unidos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LOWER CRETACEOUS DINOSAUR TRACKS, PALUXY RIVER VALLEY, TEXAS. James O. Farlow. South Central G. S. A., Baylor University, 1987.

THE DINOSAURS OF DINOSAUR VALLEY STATE PARK. James O. Farlow. Texas Parks and Wildlife Press, 1993.

THE COMPLETE DINOSAUR. Dirigido por James O. Farlow y M. K. Brett-Surman. Indiana University Press, 1997.

Aprovechamiento energético del punto cero

El espacio vacío está lleno de energía. Pero, ¿podría aprovecharse, según proponen algunos? No parece probable

Philip Yam

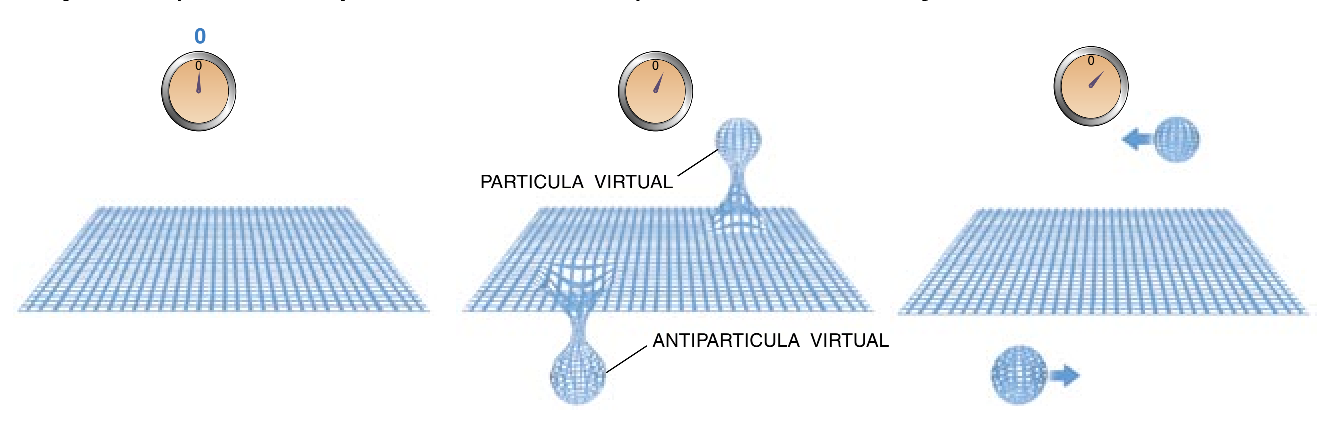
Algo por nada. Esa esperanza es la razón de ser del borboteo del agua, los transductores ultrasónicos, los calorímetros, los programas de representación de datos y demás utensilios —algunos con pintas de haber salido del cuarto de los trastos— del Instituto de Estudios Avanzados de Austin, Texas, que no hay que confundir con el laboratorio de igual nombre pero mayor renombre de Princeton, Nueva Jersey, donde, entre otros, Albert Einstein exploró los secretos fundamentales del espacio y del tiempo. El de Austin está equipado con más modestia, pero sus objetivos no son menos revolucionarios. Allí prueban unas máquinas que, según sus inventores, pueden sacar energía del espacio vacío.

Ni que decir tiene que sigue habiendo quienes pretenden haber creado máquinas de movimiento perpetuo y motores que no disipan energía, pese a que, no hay vuelta de hoja, violen siempre alguna ley de la termodinámica. Pero la energía del vacío es bien real. Según la física moderna el vacío no es la nada. Hasta en el cero absoluto, la temperatura donde todo movimiento cesa, pulula una actividad que no vemos.

No se sabe cuánta "energía de punto cero" hay en el vacío. Algunos cosmólogos han conjeturado que al principio del universo, cuando en todas partes las condiciones se parecían más a las de un agujero negro, la energía del vacío debió de ser grande y hasta puede que desencadenara la gran explosión original (el *big bang*). El nivel de energía tiene que ser menor ahora. Lo que no obsta para que unos cuantos optimistas crean que el vacío nos reserva todavía un rico manantial; sólo se requiere saber explotarlo. Según estos heterodoxos la energía del punto cero podría ser la explicación de la "fusión fría", de la inercia y de otros fenómenos, y algún día podría aplicarse en un sistema de "masa negativa" de propulsión espacial.

Pero la mayoría de los físicos no ven las cosas así. La opinión aceptada es que la energía del vacío es minúscula. Si fuese infinita, el universo sería muy diferente: no podríamos ver en línea recta más allá de unos kilómetros. "Hay una especie de fetichismo por el vacío", comenta Peter W. Milonni, del Laboratorio Nacional de Los Alamos. "Hay que cuidarse de ser ingenuos con este concepto." Steve K. Lamoreaux, del mismo laboratorio, se muestra más contundente: "A los de la energía del punto cero les va mejor con la publicidad y la autopromoción que con las investigaciones científicas de verdad."

El concepto de energía del punto cero deriva de una conocida noción de la mecánica cuántica, la ciencia de las partículas de dimensiones atómicas:



1. LAS FLUCTUACIONES cuánticas, ondulaciones de las que nace la energía del vacío, llenan la textura del espacio y el tiempo.

el principio de indeterminación de Heisenberg, que limita la precisión de las mediciones. Werner Heisenberg estableció en 1927 que es imposible discernir a la vez la posición y el momento de una partícula más allá de cierto grado de precisión; si se conoce perfectamente la posición nada se sabrá del momento, y viceversa. Por eso, una partícula temblará aun en el cero absoluto: si permaneciera quieta se conocerían a la vez con toda exactitud tanto su posición como su momento, y se violaría el principio de indeterminación.

Lo mismo que la posición y el momento, también la energía y el tiempo obedecen la regla de Heisenberg. Tiene que haber, pues, una energía residual en el espacio vacío: para saber con certeza que no hay energía en un volumen de espacio habría que estar midiéndola un tiempo infinito. Y dada la equivalencia de masa y energía expresada por la fórmula de Einstein $E = mc^2$, la energía del vacío tiene que poder crear partículas. Existen sólo durante un ínfimo lapso de tiempo, fijado por el principio de indeterminación.

Esta energía del punto cero (que corresponde a todos los tipos de campo de fuerza: electromagnético, gravitatorio y nuclear) se manifiesta de varias maneras, casi todas perceptibles sólo para el físico. Una es el desplazamiento de Lamb, una ligera alteración de la frecuencia de la luz que emite un átomo excitado. Otra es un nivel bajo de ruido que registran los aparatos electrónicos y ópticos.

Pero quizá la más llamativa sea el efecto Casimir. El físico holandés H.B.G. Casimir calculó en 1948 que entre dos placas de metal que estén suficientemente cerca habrá una levísima atracción. La razón estriba en la estrechez del espacio entre ellas, que sólo deja que entren los "modos" electromagnéticos de la energía del vacío menores, de alta frecuencia; las placas bloquean casi todos los modos mayores. Remedan el comportamiento de las alas de los aviones, que crean una zona de baja presión a un lado y de alta presión al otro: en este caso la diferencia de fuerza empuja las placas entre sí.

Lamoreaux realizó —estaba entonces en la Universidad de Washington y contó con la ayuda de su alumno Dev Sen— la medición más precisa del efecto Casimir. Por placas utilizó superficies de cuarzo recubiertas de oro. Una estaba conectada al extremo de un sensible péndulo de torsión; si se movía hacia la otra, éste se retorcía. Un láser medía la torsión con una precisión de 0,01 micras. Una corriente aplicada a unos componentes piezoeléctricos apilados movía una de las placas de Casimir, pero un sistema electrónico de retroalimentación contrarrestaba ese movimiento y el péndulo se quedaba quieto. El efecto de la energía del punto cero se manifestaba en cambios en la corriente necesaria para mantener el péndulo en su sitio. Lamoreaux obtuvo que las placas generaban una fuerza de unas 100 microdinas (un nanonewton), el "peso de un eritrocito en el campo gravitatorio de la Tierra", dice Lamoreaux. El resultado coincidía, dentro de un margen del 5 por ciento, con la predicción de Casimir para esa separación entre las placas y esa geometría.

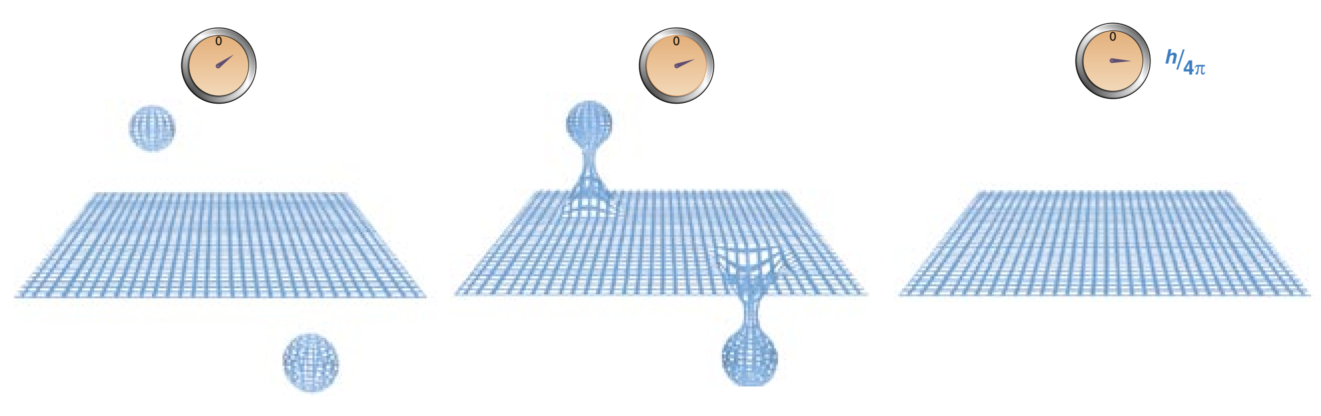
Poner de manifiesto la existencia de la energía del punto cero es una cosa; extraer de ella una cantidad útil, otra. El Instituto de Estudios Avanzados de Austin, que dirige Harold E. Puthoff, viene a ser una minioficina de pesos y medidas; ha examinado unos diez dispositivos durante los últimos diez años, sin encontrar ninguno que funcione.

Uno de esos artilugios, cuyo inventor, ruso él, decía que producía kilowatts de calor extra, se basaba supuestamente en la sonoluminiscencia, la conversión del sonido en luz. Si se bombardea el agua con sonido para crear burbujas de aire, puede ocurrir, en condiciones adecuadas, que haya burbujas que se derrumben y desprendan destellos de luz. La explicación ordinaria es que dentro de la burbuja que se derrumba se dispara una onda de choque que calienta su interior hasta el punto de producir el destello.

Siguiendo los pasos del nobel Julian Schwinger, unos pocos dan como causa la energía del punto cero. La idea, en líneas generales, es que la superficie de la burbuja viene a actuar como las placas de la fuerza de Casimir: conforme se contrae, va excluyendo los modos mayores de la energía del vacío, que se convierte en luz. Pese a esta teoría, Puthoff y Scott Little, que probaron el aparato con incesantes retoques y modificaciones, no hallaron en ningún caso que se ganara energía.

Puthoff cree que es mejor enfocar la cosa con átomos que con burbujas. Su idea depende de una hipótesis no demostrada: que los electrones de los átomos se mantienen en órbita alrededor del núcleo gracias a la energía del punto cero. La física clásica dice que una carga que se mueva como

2. LAS PARTICULAS VIRTUALES nacen —en parejas de partícula y antipartícula— de la energía de las fluctuaciones cuánticas. Aunque pueden interaccionar, su vida es brevísima: de acuerdo con el principio de indeterminación de Heisenberg desaparecen en un lapso fijado por la constante de Planck, *h*.



un electrón en un átomo debería perder energía mediante la emisión de radiación. Si el electrón sigue dando vueltas al núcleo es, según Puthoff, porque absorbe sin cesar energía del punto cero. (La formulación original de la mecánica cuántica se limita a declarar que un electrón ha de tener en el átomo una energía mínima, o estado fundamental.)

Se ha demostrado experimentalmente que una cavidad lo bastante pequeña suprime la tendencia natural de una partícula encerrada y excitada a emitir una cantidad determinada de energía y caer a un estado de energía inferior. Lo que sucede, en esencia, es que la cavidad es tan exigua, que excluye algunas de las fluctuaciones de baja frecuencia del vacío necesarias para que el átomo excitado emita luz y caiga a un estado de menor energía. La cavidad controla las fluctuaciones de vacío.

Puthoff razona que, en circunstancias apropiadas, se podría manipular el vacío de forma que apareciera un nuevo estado fundamental de menor energía. El electrón caería entonces a él —el átomo se empequeñecería— y cedería al hacerlo una cantidad de energía. “La inyección, pues, de hidrógeno o deuterio en una cavidad adecuada produciría energía”, dice Puthoff. Comenta que esto podría explicar los experimentos de fusión fría; los resultados positivos de éstos podrían ser manifestaciones de la energía del punto cero y no, como cabría suponer, un confundir las ganas con la realidad.

Pero en la electrodinámica cuántica de cavidades la experimentación es de por sí harto delicada. No está claro hasta qué punto el “encogimiento de átomos” sería una fuente viable de energía. El instituto de Austin está probando un dispositivo que manipula, o así cabe interpretar lo que hace, el vacío, pero Puthoff declina dar detalles ya que, dice, hay un acuerdo de confidencialidad con sus creadores.

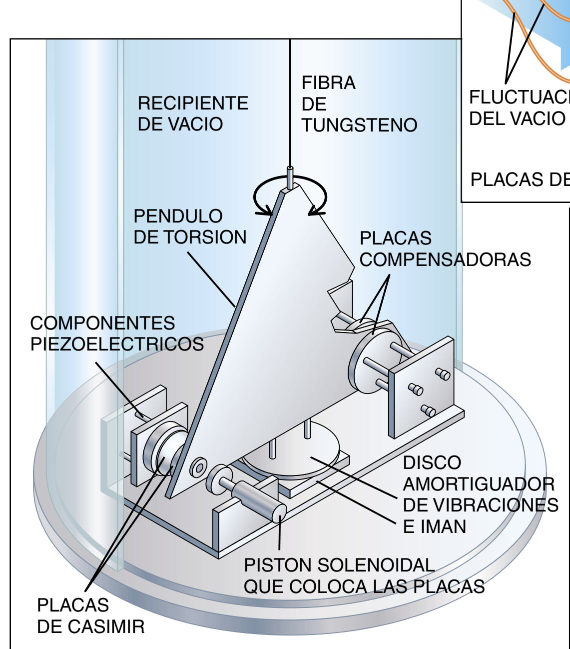
Tras estos intentos de aprovechar la energía del vacío está la suposición de que posee energía susceptible de explotación. Las matemáticas de la mecánica cuántica indican que, aun considerando sólo las fluctuaciones del campo electromagnético, cualquier volumen de espacio vacío contiene un número infinito de frecuencias de energía del vacío y, por tanto, una reserva infinita de energía (sin contar la contribución de las demás fuerzas). Este mar de energía nos resulta casi por completo invisible, según los forofos de la energía del punto cero, porque es uniforme y nos bombardea en todas direcciones, de manera que la fuerza neta que actúa sobre cualquier objeto es nula.

Pero que las ecuaciones produzcan un infinito no quiere decir que exista en un sentido práctico un infinito. Los físicos “renormalizan” una vez y otra también las ecuaciones para librarse de los infinitos y poder así atribuir un significado físico a sus números. Un ejemplo es el cálculo de la masa del electrón a partir de principios teóricos, que en apariencia conduce a un irreal valor infinito. Hay que hacer el mismo tipo de juego de manos matemático para los cálculos de la energía del vacío. “La idea de que la energía del vacío es infinita es demasiado ingenua”, apostilla Milonni.

En realidad hay diversos indicios de que la energía que guarda el vacío no es como para lanzar las campanas al vuelo. Se puede considerar que el experimento de Lamoreaux extrajo unos 10^{-15} joules. Cantidad tan nimia parece una prueba letal contra la esperanza de sacarle partido energético al vacío. Pero Puthoff replica que las placas de Casimir son objetos macroscópicos. Para una extracción práctica de energía hacen falta muchas placas, unas, digamos, 10^{23}. Sería posible con unos sistemas que empleasen micropartículas, átomos por ejemplo. “Lo que pierdes en energía por interacción lo ganas con el número de interacciones”, dice.

Milonni objeta que las placas de Lamoreaux están hechas de átomos, así que en ellas ya intervienen 10^{23} partículas. Del bajo resultado de Casimir se sigue, según sus cálculos, que las placas tendrían que medir kilómetros de largo para generar una fuerza de sólo un kilogramo. Además, extraer la energía del movimiento de aproximación de las placas tiene un coste, señala Milonni: “También tienes que separarlas.”

Otro argumento que da cuenta de la insignificancia de la energía del vacío es que el tejido del espacio y el tiempo, aunque se curve un poco alrededor de los cuerpos, es a gran escala casi plano. Si se dibuja un triángulo en el espacio, la suma de sus ángulos será de 180 grados, como en una hoja de papel. (En una esfera sumarían más de 180 grados.) Como la energía equivale a la materia y la materia ejerce una fuerza gravitatoria, un vacío rico en energía crearía un intenso campo gravitatorio que distorsionaría el espacio y el tiempo de manera que el universo entero se desplegaría de forma muy distinta de lo observado.



3. EL EFECTO CASIMIR es la atracción de dos placas paralelas a causa de las fluctuaciones cuánticas en el vacío. Las placas están tan cerca, que entre ellas sólo caben pequeñas fluctuaciones; los modos mayores son excluidos (*arriba*); como ejercen una fuerza total mayor que los modos menores, empujan cada placa contra la otra. Steve K. Lamoreaux observó el efecto con un péndulo de torsión (*izquierda*). Una corriente aplicada a los componentes piezoeléctricos apilados intentaba desplazar la placa de Casimir unida al péndulo; las placas compensadoras mantenían a éste quieto. El voltaje necesario para evitar su torsión era una medida del efecto Casimir.

4. ESTA MAQUINA de burbujas generadas ultrasónicamente extraía, decían, energía del punto cero (*derecha*). Harold E. Puthoff (*abajo*), director del Instituto de Estudios Avanzados de Austin, prueba dispositivos como éste. Hasta ahora no se ha encontrado ninguno que produzca una ganancia neta de energía.



Este argumento está ligado a la constante cosmológica, concepto creado, y luego descartado, por Einstein. En las ecuaciones que describen el estado del universo es un término —en el cual se incorpora la energía del punto cero— que, en cierto sentido, contrarrestra a la gravedad. Las observaciones astronómicas señalan que su valor ha de ser pequeño. En consecuencia, si la energía del vacío fuese de verdad grande, tendría que haber otra fuerza que contribuyese también a la constante y anulase el efecto de aquélla. Y, como dice Steven Weinberg en *El sueño de una teoría final*, esa anulación no parece natural: los cálculos que se las apañan con los términos infinitos arrojan una energía del vacío 120 órdenes de magnitud mayor que el valor casi nulo de la constante cosmológica; la otra fuerza habría de ser opuesta a la del vacío, aunque de igual magnitud en 120 decimales.

Puthoff replica que la conexión entre la constante cosmológica y la energía del punto cero es más compleja de lo que suele percibirse. "Es evidente que el problema de la energía del punto cero y el de la constante cosmológica, aunque guardan relación, son en realidad diferentes", arguye Puthoff, y observa que las predicciones de la mecánica cuántica han resultado ser correctas una y otra vez, mientras que a los cosmólogos aún se les escapa algo.

Estas discrepancias no son insólitas en la ciencia, en especial si se considera cuánto se ignora de la energía del punto cero. Pero los candidatos a magnates de las futuras compañías de la energía del punto cero y su creencia en que merece la pena investigar cómo podría explotarse irritan a algunos científicos ortodoxos. "Se me ha caído el alma a los pies al ver la atención que me prestaban los de esa cuerda, para mí unos chiflados", protesta Lamoreaux refiriéndose a su celebridad entre los amigos del punto cero tras la publicación de su resultado sobre el efecto Casimir. "Trivializan mi trabajo y lo usan de manera abusiva."

El instituto de Puthoff recibe una pequeña ayuda económica del gobierno, pero la mayor parte de sus fondos procede de contratos con firmas privadas. Otros tienen un respaldo público más explícito. El pasado mes de agosto la NASA patrocinó un "Seminario sobre los Avances de la Física de la Propulsión". Según algunos participantes, la energía del punto cero se convirtió en una de las favoritas de quienes intentaban determinar qué "avances" habría que tener en cuenta en el futuro.

La aplicación de la energía del vacío a la propulsión parte de una conjetura propuesta en 1994 por Puthoff, Bernhard Haisch, del laboratorio de investigaciones de Lockheed en Palo Alto, y Alfonso Rueda, de la Universidad estatal de California en Long Beach. Su idea es que la inercia —la resistencia que los cuerpos ofrecen a que se los acelere— dimana del efecto de arrastre que experimentan al atravesar el campo del punto cero. Como éste puede manipularse en ciertos experimentos cuánticos, razona Puthoff, sería posible aminorar la inercia de un objeto y, en el caso de un cohete, reducir la carga de combustible. Puthoff y sus compañeros han intentado demostrar esta hipótesis sobre el origen de la inercia (un péndulo sensible podría detectar la "estela" en la energía del punto cero de un objeto en movimiento), aunque reconoce que no han logrado todavía aislar el sistema con la finura que ello exige.

Qué duda cabe que debe haber sitio para las ideas singulares, que podrían ser revolucionarias, pero no a expensas de la ciencia sólida. "Hay que tener un espíritu abierto, pero hasta ahora no he visto nada que no viole la conservación de la energía", concluye Milonni. Al valorar los proyectos sobre la energía del punto cero lo mejor es tener presente el viejo aviso de navegantes: si parece demasiado bueno para ser cierto, lo más probable es que no lo sea.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DEMONSTRATION OF THE CASIMIR FORCE IN THE 0.6 TO 6 μm RANGE. S. K. Lamoreaux en *Physical Review Letters*, vol. 78, n.º 1, páginas 5-8; 6 de enero, 1997.

QUANTUM FLUCTUATIONS OF EMPTY SPACE: A NEW ROSETTA STONE IN PHYSICS? Harold E. Puthoff. Disponible en http://www.livelinks.com/sumeria/free/zpe1.html en Internet.

Plantas resistentes a insectos

Se han obtenido plantas con propiedades insecticidas capaces de controlar especies muy dañinas. La siembra de sus semillas constituye el primer paso para el establecimiento de una agricultura rentable

Juan José Estruch

La agricultura ha sido, es y probablemente será uno de los sectores fundamentales para el mantenimiento de nuestra civilización. A lo largo de la historia, la producción agraria y sus prácticas han estado muy ligadas al desarrollo de la humanidad sirviendo a una finalidad muy concreta; la de proveer suficiente alimento para mantener el crecimiento de la población.

En estos momentos la población mundial ronda los 6000 millones de personas. Si el crecimiento continúa al ritmo actual del 2 %, la población se duplicará de aquí a 30 o 40 años. Al mismo tiempo, como resultado del incremento de la actividad industrial y humana, la proporción de suelos arables va disminuyendo en un 0,1 % anual. Asistimos, pues, a una demanda de producción agrícola sin precedentes, en un período en el que el porcentaje de suelo arable disminuye y las prácticas de control de plagas resultan manifiestamente ineficaces.

La idea de obtener plantas que resistieran la agresión de los insectos ha sido un viejo sueño acariciado por científicos y agricultores. Si le preguntásemos a un campesino cuáles son las mayores amenazas que teme que se ciernan sobre su cosecha nos respondería que el tiempo y la plaga de insectos.

No está en la mano del hombre modificar las condiciones meteorológicas. Más asequible parece la lucha contra los insectos. Las plantas transgénicas ofrecen un ejemplo elocuente de respuesta de la ciencia a ese respecto. Los insectos constituyen el grupo de organismos más abundante de la Tierra. Muchos causan daños considerables en las cosechas. Sin miedo a exagerar, podría afirmarse que el desarrollo de la agricultura ha dependido en buena medida de la capacidad del hombre para amortiguar las pérdidas provocadas por los insectos.

Los programas actuales de control de insectos se basan de manera casi exclusiva en la aplicación de insecticidas, que en su mayor parte (por encima del 95 %) son productos químicos de carácter tóxico para un amplio espectro de especies agresoras. Pese al empleo masivo de tales sustancias químicas, que sobrepasa la cifra de 10 millones de toneladas, y su elevado coste, que ronda los 1,5 billones de pesetas al año, se siguen perdiendo del 20 al 30 % de las cosechas mundiales por culpa de los insectos.

En menor proporción, con una cuantía que no llega al 5 %, se usan también bioinsecticidas, de origen biológico como su nombre denuncia, que hallan su expresión más acabada en la obtención de plantas resistentes.

Los bioinsecticidas se basan en combinaciones de proteínas derivadas de *Bacillus thuringiensis*. Este microorganismo es una bacteria grampositiva del suelo que en los estadios de esporulación produce unos cristales peculiares constituidos por proteínas dotadas de propiedades insecticidas. Aunque es muy probable que *B. thuringiensis* fuese la bacteria identificada como *Bacillus soto* por el biólogo japonés S. Ishiwata en 1901, quien la asoció al agente causal de la enfermedad del soto del gusano de seda, fue el investigador alemán E. Berliner quien la redescubrió en 1909 y la clasificó con su nombre actual de *B. thuringiensis*.

Berliner aisló la bacteria de los cadáveres del gusano mediterráneo de la harina (*Ephestia kuehniella*), agente contaminante de la harina con que se amasaba el pan en Turingia. Creyendo Berliner que la bacteria era el agente de la muerte del insecto, sugirió la idea de recurrir a *B. thuringiensis* para atajar las plagas de insectos. Y así, los primeros preparados comerciales de *B. thuringiensis* aparecieron en 1938 en Francia bajo el nombre de Sporeine; se utilizó contra la oruga del taladro del maíz (*Ostrinia nubilalis*), uno de los insectos más destructivos de la gramínea.

A finales de los años cuarenta se descubrió que la actividad insecticida de *B. thuringiensis* estaba asociada a la producción de cristales parasporales de naturaleza proteínica. A estas proteínas se las denomina "cry" por su capacidad de formar cristales o δ-endotoxinas por su acumulación en el interior de la bacteria y su carácter tóxico. La toxicidad de las δ-endotoxinas se debe a su capacidad de interaccionar con las membranas de las células intestinales de los insectos provocando su lisis celular. Se conocen ya unas 96 endotoxinas diferentes, algunas de las cuales forman parte de formulaciones comerciales de bioinsecticidas.

La eficacia insecticida de las endotoxinas contra la mayoría de los insectos cuyo control puede resultar importante para la agricultura, sumada a su especificidad y a su limitado (si no inexistente) nivel de toxicidad, hacen de esas proteínas las soluciones ideales para su empleo en el campo.

A principios de los años ochenta, el sector emergente de la biotecnología vegetal se propuso obtener plantas que

1. *BACILLUS THURINGIENSIS* en fase de esporulación. Las esporas son las partes más refringentes, que se asemejan a una burbuja en el interior del microorganismo. En la zona derecha se observan los cristales paraesporales de naturaleza proteica que caracterizan a las endotoxinas. La morfología del cristal constituye el primer criterio de identificación. Los cristales bipiramidales denotan endotoxinas de la clase Cry1A con actividad insecticida contra los lepidópteros.

JUAN JOSE ESTRUCH dirige la unidad de control de insectos del Instituto de Biotecnología de Plantas de la empresa Novartis emplazado en Research Triangle Park, Carolina del Norte. Estruch ha dedicado sus últimos tres años a la creación de plantas transgénicas de interés comercial. Tras obtener el doctorado en bioquímica y biología molecular por la Universidad de Valencia y luego de una estancia posdoctoral en el Instituto Max-Planck de Plantas en Colonia, se trasladó a los Estados Unidos en 1992.

opusieran resistencia a la acción de los insectos mediante la introducción de genes que cifran endotoxinas. Por un lado, el aislamiento y caracterización del primer gen que determina una proteína insecticida en 1981 por E. Schnepf y H. Whiteley, del departamento de microbiología de la Universidad estatal de Washington, y por otro la obtención de las primeras plantas transgénicas de tabaco en 1983 mediante la utilización de *Agrobacterium tumefaciens* por M.D. Chilton, del mismo departamento, señalaron el inicio de la era de obtención de plantas transgénicas resistentes a insectos.

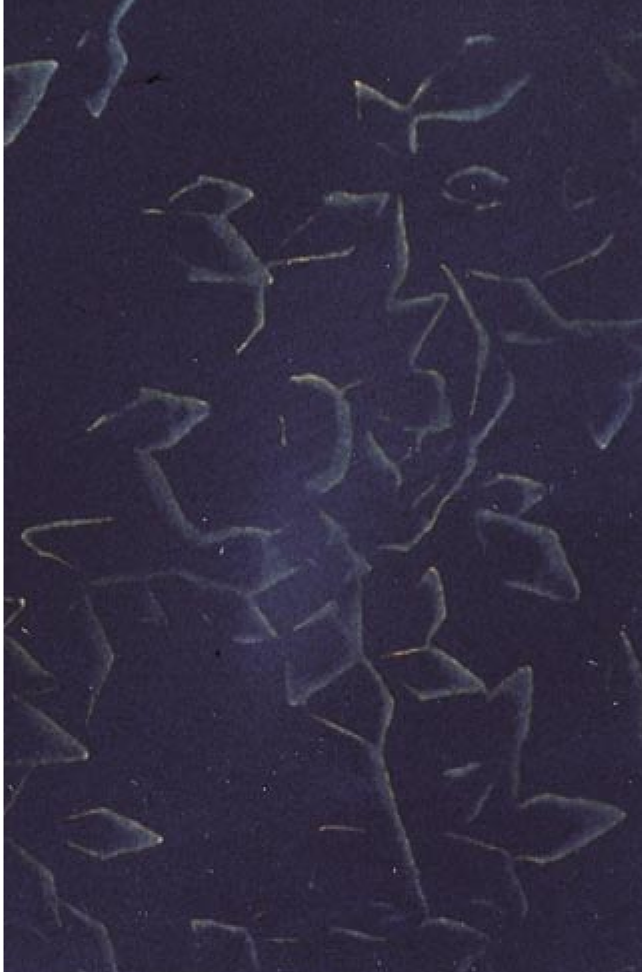
Los investigadores del departamento de genética de la Universidad de Gante, dirigidos por J. Leemans, transformaron plantas de tabaco con el gen que cifra la endotoxina Cry1A(b). El modelo experimental empleado por ese grupo belga se basó en fusionar la proteína insecticida con una proteína "marcadora" que les permitió seleccionar las plantas transgénicas con el nivel de expresión más alto.

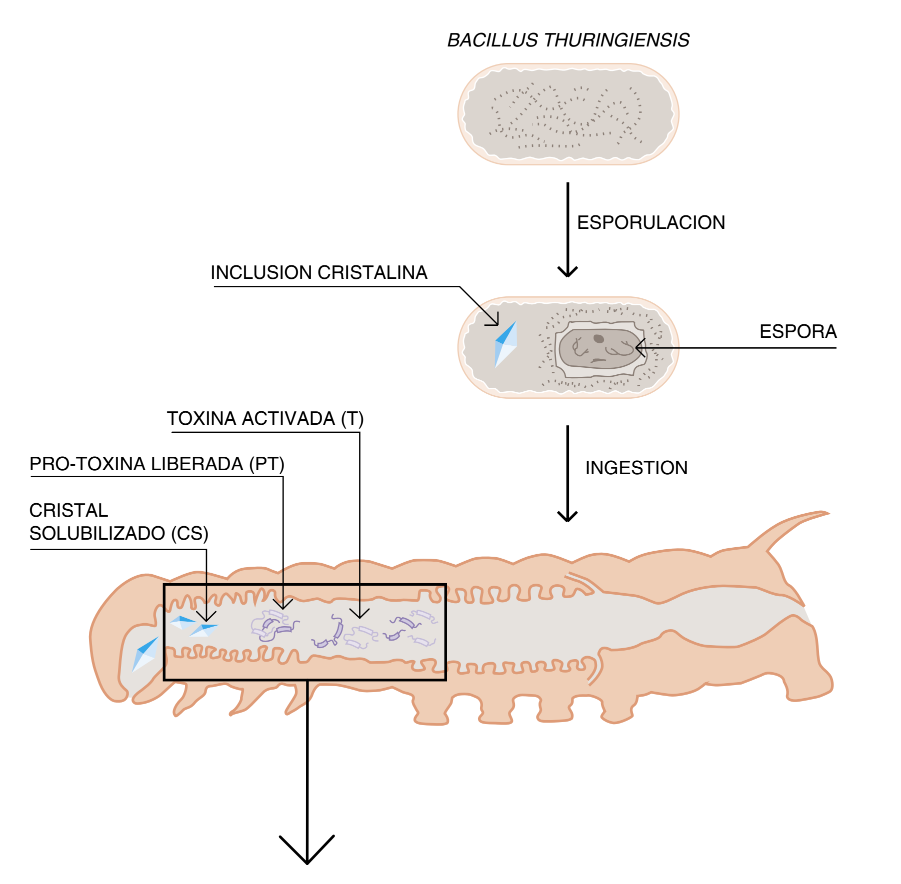
Por proteína "marcadora" se escogió la neomicina fosfotransferasa, cuya expresión confiere resistencia al antibiótico kanamicina. Bajo ese experimento subyacía la idea de que, al seleccionar los transformantes por su nivel de resistencia al antibiótico, se seleccionaban de forma indirecta los que expresan la proteína insecticida en los niveles más altos.

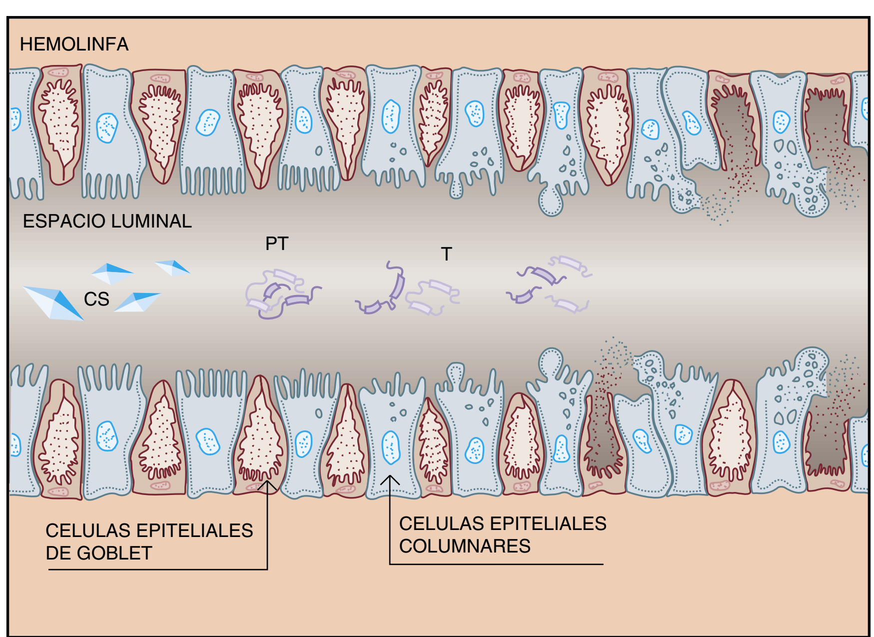
Cuando las plantas transgénicas se expusieron a la acción del gusano cornudo del tabaco (*Manduca sexta*), algunas líneas transgénicas ofrecieron una protección casi absoluta (75-100 % mortalidad) al ataque de los insectos. El grupo de Gante experimentó también con diversas configuraciones de las endotoxinas. En unos casos recurría a la proteína completa o protoxina y en otros a la forma "madura" o toxina obtenida por ingeniería genética. De tales experimentos se desprendía que la expresión en plantas de la toxina confería una mejor protección ante los insectos que la expresión de la protoxina.

Por las mismas fechas, experimentos muy similares fueron acometidos por investigadores de la unidad de control de insectos de las empresas Agracetus (dirigidos por K. Barton) y Agrigenetics (dirigidos por M. Adang), ambas radicadas en el estado de Wisconsin. Los expertos introdujeron los genes que determinan las endotoxinas Cry1A(a) y Cry1A(c), respectivamente, en tabaco. A esos trabajos hemos de añadir los realizados por la empresa Monsanto, a cuyo frente estaba D. Fischhoff, quien introdujo la endotoxina Cry1A(b) en tomate









2. PATOLOGIA DE LAS ENDOTOXINAS, absorbidas por las larvas de gusano. El gusano ingiere el cristal parasporal que se disolverá en el lumen del intestino. Para que ocurra esa disolución debe darse un determinado *p*H. En el caso de insectos del orden Lepidoptera, el *p*H de su intestino supera el valor de 9,0. En los coleópteros, el valor es más neutro (*p*H 6,5-7,3). La disolución de los cristales rinde moléculas de endotoxina en su forma protoxina, que no es activa. Se activará mediante proteasas presentes en los jugos intestinales del gusano. Las formas activadas de las endotoxinas se unirán a las membranas de las células intestinales y lisarán esas cubiertas, un proceso que termina en horas. La parálización total de la actividad intestinal del gusano le conducirá a la muerte. (La representación esquemática se basa en un dibujo presentado por Koen Hendrickx en su tesis doctoral titulada *Sobre el modo de acción de las endotoxinas* editada por la Universidad de Lovaina.)

confiriéndole resistencia (parcial en la mayoría de los casos) a los gusanos *Helicoverpa zea* y *H. virescens.*

En su conjunto, esa gavilla de ensayos operados en plantas modelo (tabaco, tomate y patata) sirvieron para demostrar que la expresión de proteínas insecticidas en plantas, amén de posible, proporcionaba un eficaz método alternativo contra los insectos. Gracias a esos experimentos también se conoció mejor el comportamiento de los genes de procariotas en organismos eucariotas.

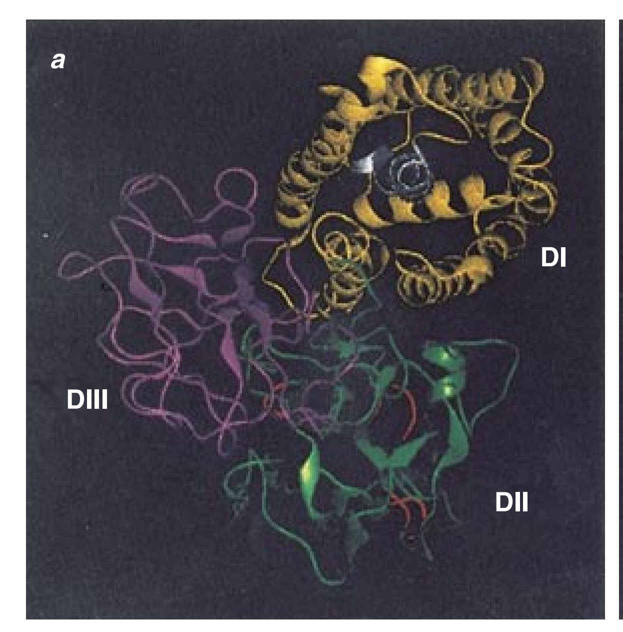
Aunque los genes aislados de *B. thuringiensis* podían expresarse en su forma nativa en plantas, los niveles de proteína sintetizada no llegaban siquiera al 0,01 % de las proteínas totales de la planta. Por otra parte, si se buscaba alcanzar una aplicación comercial de esa técnica, los laboratorios tendrían que experimentar con cultivos de mayor importancia en la agricultura: maíz, trigo, algodón, arroz o cebada. Además, los niveles de proteína insecticida obtenidos en plantas transgénicas tendrían que incrementarse de forma significativa.

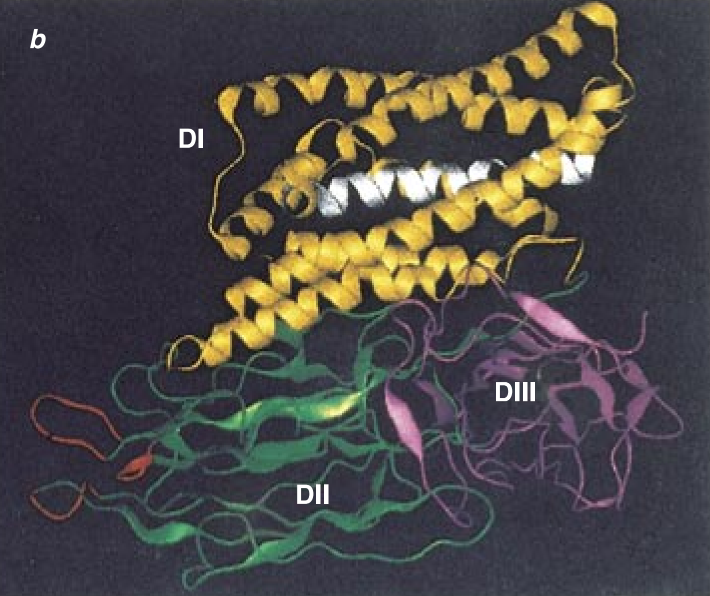
La obtención de plantas transgénicas de interés económico, protegidas del ataque de los insectos, necesita de la transmisión horizontal de genes de organismos procariotas a organismos eucariotas. Para hacer posible ese proceso, hubo que conocer mucho mejor los mecanismos moleculares implicados y dominar el cultivo de tejidos.

Por lo que se refiere a los aspectos moleculares, la investigación se centró en la estabilidad de los ARN mensajeros de origen procariota en el citoplasma de una célula eucariota; abordó también la composición de los codones que determinan aminoácidos. Al expresar los genes que cifran las endotoxinas en plantas, sus ARN mensajeros se procesaban o "cortaban" en demasía, lo que mermaba su estabilidad. Este procesamiento indeseado se debía a la diferente composición de bases entre los genes de *B. thuringiensis*, organismo proveedor, y los genes de plantas, organismos destinatarios.

En efecto, mientras que el genoma de *B. thuringiensis* presenta un 60 % de su contenido en forma de adeninas (A) y timidinas (T), en el genoma de las plantas —las monocotiledóneas, sobre todo— predominan guaninas (G) y citosinas (C), con un 60 % también.

La abundancia de segmentos de A/T en los genes de *B. thuringiensis* confundía a la maquinaria de trans-





3. ESTRUCTURA TRIDIMENSIONAL de la endotoxina Cry3A. En el panel *a* se representa la molécula vista desde arriba, donde se aprecia la estructura de "barril" del dominio I de la proteína. El dominio I es el responsable de formar el poro. La visión lateral de la molécula representada en el panel *b* expone los tres dominios de la proteína. El dominio I está formado por aminoácidos organizados en hélices alfa, mientras que el dominio II lo conforman aminoácidos organizados en hojas beta. Las hélices alfa amarillas constituyen las paredes del poro. La hélice alfa blanca se introduce en el interior de la membrana de las células del epitelio intestinal del gusano. El dominio II, involucrado en la interacción con el receptor, confiere especificidad a la endotoxina. (*Esta figura ha sido diseñada por Devon Brown, del departamento de control de insectos de la unidad de biotecnología de Novartis, utilizando las coordenadas de la estructura tridimensional de Cry3A obtenidas en el laboratorio de David Ellar, de la Universidad de Cambridge.*)

cripción de la planta, que interpretaba estas secuencias como señales de procesamiento. Por culpa de ello se desestabilizaba el ARN mensajero. Una de las técnicas desarrolladas para mejorar la expresión de genes de *B. thuringiensis* en plantas se apoyaba en la identificación de estos segmentos de A/T y su modificación por ingeniería genética.

Las modificaciones puntuales de los genes de *B. thuringiensis* aportaron resultados positivos, al incrementar de una manera notable su expresión en plantas.

Al acometer una comparación más minuciosa entre los genes de *B. thuringiensis* y los genes de plantas se puso de manifiesto una diferencia fundamental en la composición de los codones. La tercera base de los codones que codifican los aminoácidos de los genes de *B. thuringiensis* acostumbraba ser una adenina, mientras que la base que ocupa esa plaza en las plantas (sobre todo entre las monocotiledóneas) solía ser guanina o citosina. Esta observación abría la posibilidad de que los niveles de ARN de transferencia necesarios para traducir las proteínas codificadas por los genes nativos de *B. thuringiensis* no fuesen los apropiados en plantas.

Hubo que idear, pues, otra técnica para mejorar la expresión de genes de *B. thuringiensis* en plantas. El nuevo método se fundaba en la modificación sistemática de los codones del gen de *B. thuringiensis* para obtener un "gen sintético". El enfoque experimental que se apoya en genes sintéticos resulta superior a la mera modificación de segmentos de A/T, pues no sólo consigue adaptar los codones a los utilizados por la planta, sino que en el proceso sistemático de sustitución de adenina por guanina o citosina también se interrumpen los trechos de A/T. Se logra así un gen específicamente diseñado para maximizar su expresión en las plantas. (Conviene señalar que todas estas manipulaciones han de ejecutarse sin alterar la secuencia de la proteína final.)

En paralelo a ese avance de la biología molecular progresó la manipulación de tejidos vegetales, lo que posibilitó la introducción de genes exógenos en cultivos vegetales de valor agronómico. El desarrollo de métodos de transformación de protoplastos (células carentes de pared celular) abrió las puertas a la obtención de cereales transgénicos, uno de los grupos de cultivos con mayor valor alimentario. La posibilidad de introducir genes exógenos en plantas se reforzó, por un lado, con la creciente lista de especies vegetales susceptibles de ser transformadas por *Agrobacterium* y, por otro, con el advenimiento de nuevas técnicas de transformación de plantas basadas en el empleo de microproyectiles recubiertos con el ADN exógeno lanzados a gran velocidad sobre tejidos vegetales (transformación biolística).

Los primeros proyectos encaminados a obtener variedades comerciales de plantas transgénicas resistentes a insectos culminaron en 1996 con la entrada en el mercado de algodón, patata y maíz transgénicos.

En el caso del algodón, la planta modificada resistía el ataque del "complejo del capullo", desatado por *Heliothis virescens* y *Helicoverpa zea*, dos especies del orden Lepidoptera. La acción combinada de ambas larvas constituía una de las principales causas de las pérdidas en la producción de algodón. Solamente en los Estados Unidos, esta plaga causa unos perjuicios anuales que se estiman en 45.000 millones de pesetas. El grupo liderado por D. Fischhoff, de la empresa Monsanto, modificó ciertas porciones de los genes que cifran las endotoxinas Cry1A(b) y Cry1A(c), cuyo espectro




4. VARIEDADES COMERCIALES de plantas Bt que han llegado al mercado durante la temporada de cultivo de 1996. En el panel *a* se muestra una variedad de algodón transgénico que ofrece protección frente al complejo del capullo. Se puede observar claramente que las plantas no transgénicas de algodón (*a la izquierda del panel a*) han producido mucho menos algodón que las plantas transgénicas (*a la derecha del panel con un color blanquecino que evidencia la producción de algodón*). En el panel *b* se muestran hileras de plantas de patata no transgénicas y transgénicas. Las plantas no transgénicas, atacadas por el escarabajo de la patata, han perdido todas las hojas. Las plantas transgénicas están intactas ya que han controlado la infestación. En el panel *c* se muestran las plantas de maíz transgénico (*derecha*) frente a

de actividad insecticida incluye el complejo del capullo del algodón. Insertó esos genes con modificaciones en los trechos de A/T bajo el control de promotores constitutivos muy fuertes (conocidos como 35S) derivados del genoma del virus del mosaico de la coliflor.

Al transformar plantas de algodón con estos nuevos genes obtenidos por ingeniería genética, los niveles de proteína insecticida sintetizada por la planta alcanzaron el 0,3 % (un incremento de 30 veces). Los experimentos de campo realizados con algodón transgénico demostraron que ciertas líneas que expresaban la endotoxina Cry1A(c) eran las más resistentes al complejo de la cápsula del algodón. Estas variedades transgénicas de algodón se comercializaron en los Estados Unidos en 1996 plantándose en un área superior al millón de hectáreas.

En el caso de la patata, uno de los agentes más devastadores es el escarabajo de la patata (*Leptinotarsa decemlineata*), una especie del orden Coleoptera. Desde su fase larvaria el insecto consume la parte aérea de la patata diezmando las cosechas. Los daños causados por el escarabajo, más los gastos en insecticidas, cuestan a los agricultores más de 14.000 millones de pesetas; afectan a una extensión que sobrepasa el medio millón de hectáreas. Además, la rapidez con que el coleóptero adquiere inmunidad contra los insecticidas es tan proverbial como temida por los agricultores.

Utilizando las mismas herramientas moleculares aplicadas al algodón, el grupo de Monsanto modificó el gen que determina la endotoxina Cry3A, cuya actividad insecticida contra el escarabajo de la patata la hizo ideal para este proyecto. La modificación del gen conjuntamente con los promotores empleados triplicó e incluso quintuplicó los niveles de expresión de la proteína Cry3A en las patatas transgénicas, obteniendo una excelente protección en el campo contra el escarabajo. Estas variedades de patata transgénica llegaron al mercado en 1996.

El maíz merece una mención especial, aunque sólo fuera por el número de hectáreas dedicadas a su cultivo. En la oruga del taladro del maíz (*Ostrinia nubilalis*) tiene su enemigo principal. Este insecto del orden Lepidoptera, capaz de arruinar un 20 % de la producción, puede incluso destruir campos enteros. Los insecticidas tradicionales, aunque eficaces, deben aplicarse de antemano; una vez infestada la mata, los daños son prácticamente irreparables. Ahora bien, el tratamiento preventivo de los campos, no solamente resulta muy caro para el agricultor, sino que supone además la liberación de numerosos insecticidas tóxicos con un impacto negativo en el medio. De ahí que el desarrollo de maíz transgénico resistente a la oruga del taladro constituiría una alternativa excelente.

El grupo liderado por M. Koziel, de la empresa Ciba Semillas, resintetizó el gen que determina la endotoxina Cry1A(b), cuyo espectro de actividad insecticida incluye la oruga del taladro. Introdujo dicho gen en variedades comerciales de maíz. Para la resíntesis del gen se basó en la metodología de los “genes hechos a medida”; con ello no sólo se buscaba modificar ciertas secuencias del gen sino también cambiar los codones del gen introduciendo codones idóneos que la maquinaria de traducción del maíz pudiera leer. Además, el gen sintético se puso bajo el control de promotores específicos de ciertos tejidos, con lo cual la proteína insecticida sólo se expresaría en los tejidos diana de







las plantas no transgénicas (*izquierda*) después de haber sido infestadas con la oruga del taladro del maíz. Las plantas de maíz transgénico pueden resistir infestaciones 200 veces superiores a las que van a encontrar en condiciones naturales, sufriendo daños insignificantes. Las plantas Bt mostradas en esta fotografía corresponden a las variedades de algodón NuCOTN™ (comercializadas por Delta & Pine Land), variedades NewLeaf™ de patatas (comercializadas por NatureMark) y variedades Maximizer™ de maíz (comercializadas por Ciba Semillas, cuyo nombre actual es NOVARTIS Semillas). (*Las fotografías de los paneles* a *y* b *han sido cedidas por Jennifer Feldmann, de la compañía NatureMark. La fotografía del panel* c *ha sido obtenida por el entomólogo Bill Pritchett, de la compañía Novartis.*)

los que el insecto se alimenta. En este caso eran polen y hojas.

Las líneas de maíz transgénico que expresan Cry1A(b) confirieron una resistencia excelente a la oruga del taladro en numerosos experimentos que se llevaron a cabo antes de que el producto llegara al mercado en 1996. Pese a que los niveles artificiales de infestación de insectos utilizados en los campos experimentales de maíz transgénico fueron varios centenares de veces superior a los niveles naturales, las plantas de maíz transgénico apenas sufrieron daños insignificantes.

En cada uno de los ejemplos citados, el control de las plagas podría realizarse a través del uso de insecticidas químicos tradicionales. Ahora bien, estos tratamientos o bien resultan ineficaces por la biología singular del insecto (si hablamos del algodón, los insectos se establecen en el interior del capullo, fuera del alcance de insecticidas), o bien las plagas se desarrollan de una forma tan sutil y devastadora que, cuando el agricultor se percata del problema, ya es demasiado tarde.

Los productos mencionados anteriormente reciben la denominación genérica de "Plantas Bt". (La abreviatura remite al microorganismo *B. thuringiensis*.) Esas plantas mejoradas constituyen una herramienta excelente para el control de insectos. Quedan, sin embargo, ciertas cuestiones por dilucidar. No es la menor la de determinar la posible adquisición de resistencia a la endotoxina por parte del insecto. Las empresas que comercializan estas técnicas realizan un seguimiento exhaustivo del posible desarrollo de resistencia.

Además del proceso de monitorización, se están estudiando posibles estrategias de utilización de plantas transgénicas que reducirían al máximo la aparición de cepas de insectos resistentes a la proteína insecticida. Muchas de estas estrategias se basan en dos opciones, que pueden ser complementarias. En primer lugar, reservar una parte del campo para plantas no transgénicas que sirvan de "refugio" para las poblaciones de insectos que se tornaran resistentes. Estos refugios se convertirían en zonas de dilución de genes que confieren resistencia. Consiste la segunda estrategia en utilizar de forma conjunta o alternativa distintas proteínas insecticidas en una misma planta transgénica o en plantas transgénicas plantadas en años alternativos.

Las ideas y las técnicas que han hecho posible el obtener plantas transgénicas que se protegen a sí mismas del ataque de los insectos han de afrontar ciertos riesgos. A juzgar por la demanda de plantas transgénicas resistentes a insectos, es forzoso reconocer que la técnica introducida en las variedades comerciales plantadas durante la temporada de cultivo de 1996 ha respondido al nivel de expectación esperado. La expresión de proteínas insecticidas en plantas transgénicas ha proporcionado el nivel de protección deseado en un 95 % de las situaciones.

Las repercusiones positivas de la utilización de plantas transgénicas trascienden los beneficios que recaban los agricultores que emplean esta técnica o las empresas que la comercializan. En general, la calidad de las cosechas es mayor y el nivel de insecticidas químicos tradicionales se reduce significativamente, lo que redunda en beneficio también del consumidor. Sirva como ejemplo ilustrativo lo que acontece con el empleo de algodón transgénico para el control del complejo del capullo: ha reducido el uso de insecticidas químicos tradicionales (en su mayoría derivados organofosfatados que dejan numerosos residuos contaminantes) en más de 1 millón de litros con

intestinales de *p*H superior a 9,0, las toxinas de la clase Cry1A podrán desarrollar sus efectos tóxicos únicamente contra lepidópteros. Las protoxinas necesitan pasar a toxinas por acción de proteasas específicas. Por tanto, la composición de proteasas en el jugo intestinal del insecto es el siguiente eslabón de especificidad. Finalmente, las toxinas activadas se anclan en la membrana a través de interacciones específicas con "receptores". La naturaleza de esta interacción también es una fuente de especificidad.

En conclusión, una δ-endotoxina particular resulta tóxica para un determinado insecto cuando éste posee un ambiente intestinal propicio para la disolución del cristal proteico, la activación de protoxina y la unión de la toxina a la membrana de sus células epiteliales del intestino.



5. PLANTAS DE TABACO TRANSGENICO que expresan una proteína insecticida de la clase de las endotoxinas. Estas plantas de tabaco fueron infestadas con 5 larvas del gusano cornudo del tabaco (*Manduca sexta*). La planta de tabaco no transgénico acaba enteramente devorada y los insectos se han desarrollado de forma normal (nótense los estados larvales avanzados de los gusanos); por contra, la planta transgénica ha demostrado sus efectos insecticidas eliminando a los gusanos en sus fases iniciales y ha permanecido intacta. (*Estas plantas de tabaco fueron obtenidas por Nadine Carozzi y Gregory Warren de Novartis.*)

un incremento medio del 7 % en la producción del algodón.

Para entender la capacidad insecticida de las δ-endotoxinas conviene saber que estas proteínas perforan las membranas de las células epiteliales de los insectos. Los insecticidas químicos acostumbran ejercer sus efectos tóxicos por simple contacto; es decir, traspasan la cutícula del insecto para intervenir sobre el sistema nervioso del artrópodo. Ahora bien, las δ-endotoxinas no sólo deben ingerirse para cumplir su función insecticida, sino que los jugos intestinales del insecto actúan, además, como "maduradores" de dicha actividad. Los insectos absorben las δ-endotoxinas en forma de cristales, que son configuraciones inactivas de las proteínas insecticidas.

El proceso de maduración de las protoxinas que se realiza en el intestino del insecto consta de dos etapas consecutivas: disolución y procesamiento por proteasas. Al disolverse en el jugo intestinal, las protoxinas (proteínas de un peso molecular aproximado de 130 kilodaltons) se convierten en substratos de las proteasas que actúan a modo de tijeras, pues cortan ciertos fragmentos de la protoxina y generan la toxina o forma activa de las proteínas insecticidas (proteínas de 60-70 kilodaltons). Las toxinas maduras están capacitadas para anclarse en las membranas de las células epiteliales del insecto. Este anclaje conlleva la formación de poros que desequilibran osmóticamente la célula y producen su lisis celular.

El análisis de la estructura tridimensional de una de las δ-endotoxinas, Cry3A, por el equipo de investigación dirigido por D. Ellar, de la Universidad de Cambridge, ha permitido aclarar la formación de los poros y establecer las regiones de la proteína que participan en este proceso. Los últimos modelos propuestos por Takashi Yamamoto, de la unidad de control de insectos en Novartis, suponen la oligomerización de seis moléculas de la δ-endotoxina, previa a su inserción en la membrana con la correspondiente formación de un poro.

Las propiedades insecticidas de las δ-endotoxinas son muy específicas para ciertos insectos. Esta especificidad se funda en los procesos implicados en el tránsito de protoxina a toxina. Aunque los cristales de δ-endotoxinas pueden consumirlos numerosos insectos, sólo los que poseen el *p*H de su jugo intestinal adecuado disolverán los cristales. Por ejemplo, la familia de δ-endotoxinas Cry1A es soluble a *p*H por encima de 9,0. Puesto que sólo los insectos del orden Lepidoptera tienen jugos

Aunque las endotoxinas son las proteínas insecticidas de mayor uso en la generación de plantas transgénicas, no constituyen las únicas. Se han identificado otras de naturaleza diferente cuya expresión en los vegetales puede resistir la agresión de ciertos insectos. Fijémonos en las lectinas y en los inhibidores de proteasas, dos ejemplos de las otras proteínas insecticidas que se emplean en plantas transgénicas.

Para procesar las proteínas que consumen, los insectos necesitan de la acción de proteasas en su sistema digestivo. Los grupos encabezados por D. Boulder, de la Universidad de Durham, y C. Ryan, de la de Washington, han caracterizado una familia de proteínas cuya función es la de inhibir las proteasas de los insectos. Los genes que determinan estos inhibidores de proteasas se han expresado en plantas de tabaco y producen un control parcial de ciertos insectos. En este sentido, el grupo de W. Stiekema, del Centro de Investigación del Desarrollo y Reproducción de Plantas de Holanda, ha observado que hay insectos capaces de modificar la composición de proteasas en su intestino para protegerse de la presencia de inhibidores de proteasas.

Las lectinas, por otra parte, son una familia de proteínas con propiedades insecticidas que abundan en semillas de leguminosas. Se ha sugerido incluso que una de las funciones de las lectinas sería la de evitar que los insectos consuman la semilla, impidiendo la propagación de la planta. Aunque se ignora la razón por la cual las lectinas son insecticidas, se sabe que se unen con gran afinidad

a proteínas glicosiladas del intestino del insecto.

El grupo dirigido por T. Czapla, de Pioneer Hi-Bred, ha caracterizado numerosas lectinas cuyos genes codificantes han sufrido ciertas transformaciones. Las plantas transgénicas que expresan lectinas retardan el desarrollo de la larva, lo que hace ineficaz la agresión del insecto. Pero por sí mismas estas plantas expresan niveles insuficientes de lectinas para manifestar propiedades insecticidas.

En cualquier caso, la utilización de inhibidores de proteasas y de lectinas en el contexto de plantas transgénicas es una alternativa potencial.

Entre las proteínas dotadas de eficacia insecticida cuya expresión en plantas transgénicas posibilitaría la lucha contra los insectos destacan también las oxidasas de polifenoles, enzimas cuya ingestión por los insectos desencadenaría la oxidación de los componentes dietéticos con un resultado tóxico. A ellas hemos de agregar los inhibidores de α-amilasas y las quitinasas; los primeros serían enzimas que, una vez absorbidas, obstaculizarían los procesos digestivos, que requieren la acción de α-amilasas. Las expresión de quitinasas en plantas y su ingestión por insectos resultaría en una destrucción de la membrana peritrófica, uno de los componentes fundamentales del intestino del insecto cuya composición se basa fundamentalmente en quitina.

Resulta atractivo el contemplar la obtención de plantas resistentes a insectos como un triunfo de la técnica. Sin embargo, sus implicaciones van mucho más allá. El desarrollo de plantas insecticidas no sólo ha renovado las esperanzas depositadas por los agricultores en esas posibilidades de la técnica, sino que permite ver en ellas un remedio eficaz en la lucha contra el hambre.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

TRANSGENIC PLANTS: AN EMERGING APPROACH TO PEST CONTROL. J. J. Estruch, N. B. Carozzi, N. Desai, N. B. Duck, G. W. Warren y M. G. Koziel en *Nature Biotechnology*, vol. 15, págs. 137-141; febrero 1996.

ADVANCES IN INSECT CONTROL. THE ROLE OF TRANSGENIC PLANTS. Dirigido por N. B. Carozzi y M. G. Koziel, Taylor & Francis, 1997.

WORLD WIDE WEB SITE: www.lights.com/GABA (Global Agricultural Biotechnology Association).





El puente colgante más largo del mundo

El puente de Akashi Kaikyo, que ha batido muchos récords, aguantó hasta un terremoto mientras se estaba construyendo

Satoshi Kashima y Makoto Kitagawa

Cuando se abra al tráfico en abril, el puente de Akashi Kaikyo salvará casi cuatro kilómetros, 3910 metros para ser exactos. El puente colgante más largo del mundo pondrá a la isla de Shikoku en conexión con el resto del Japón, sin bloquear por ello el libre paso de los barcos que naveguen por el canal. Su luz central alcanzará 1990 metros, sus torres se elevarán 283 metros sobre el agua y sus cables resistirán una fuerza de tracción de 120.000 toneladas métricas; sin parangón, en definitiva, con cualquier otro puente hasta ahora construido.

El puente será la gloriosa coronación de un trabajoso sistema que pone en comunicación las cuatro islas principales del archipiélago japonés: Honshu, Hokkaido, Kyushu y Shikoku. La menor, Shikoku, tiene una población de aproximadamente un millón de habitantes y está separada de la mayor, Honshu, por el mar de Seto, un mar interior. En los años treinta, Chujiro Haraguchi, ingeniero que más tarde ocuparía la alcaldía de Kobe, propuso un puente que uniera las dos islas. Se inspiró en los puentes colgantes norteamericanos como el Golden Gate de San Francisco, entonces en construcción. Pero en aquel entonces ni la economía del Japón, ni las posibilidades de la ingeniería estaban preparadas para una hazaña semejante.

En 1959 el Ministerio de Construcción y los Ferrocarriles Nacionales Japoneses comenzaron a estudiar diversos planes para unir las dos islas. En 1970 se constituyó la Sociedad para el Puente de Honshu-Shikoku, con el fin de proyectar, construir y mantener los sistemas viario y ferroviario. Sus ingenieros optaron por un sistema de tres puntas: la ruta Kojima-Sakaide, que se terminó en 1988; la ruta Kobe-Naruto, donde figura el puente de Akashi Kaikyo; y la ruta Onomichi-Imabari.

1. ENLACE VITAL entre dos islas japonesas, el de Akashi Kaikyo será el puente colgante más largo del mundo. Salva un canal de navegación de cuatro kilómetros de longitud. Al tener que respetarse el tráfico naval, la obra tuvo que afrontar varios desafíos. Uno de los problemas fue tender el cable desde una torre a la otra, lo que se resolvió con la ayuda de un helicóptero que instaló primeramente un cable guía más ligero.

2. UNA AMBICIOSA RED de carreteras y puentes, concebida en los años setenta, une la isla de Shikoku con la de Honshu, de mayor extensión. Las ciudades de Kobe y Naruto se hallarán conectadas gracias al puente de Akashi Kaikyo, todavía por terminar, y al de Ohnaruto, que entró en servicio en 1985. La ruta Kojima-Sakaide quedó inaugurada en 1988. Permanecen, sin embargo, en construcción varios puentes largos en la ruta Onomichi-Imabari. Todas las carreteras estarán abiertas para el final del siglo.

Los tramos de los dos últimos itinerarios se encuentran ya parcialmente abiertos al tráfico de carretera. Pero además del puente de Akashi Kaikyo, que une Honshu con la isla de Awaji en la dirección de Shikoku, se están terminando varios puentes de gran luz, en la ruta Onomichi-Imabari, cuyas obras acabarán en lo que queda de siglo.

Se estima que el puente de Akashi Kaikyo costará 500.000 millones de yens (alrededor de 600.000 millones de pesetas). Dará cabida a tres carriles de tráfico en cada sentido. Junto con los 400 ingenieros de la Sociedad para el Puente, han contribuido a su proyecto y construcción un incontable número de ingenieros de los sectores privado y universitario. Además de las importantes tensiones mecánicas sobre la estructura, resultantes de su gran luz, el puente plantea varios retos. El estrecho de Akashi ("Akashi Kaikyo"), al que cruza, tiene que permanecer abierto al tráfico marítimo incluso durante la construcción. A los ingenieros les preocupaba que si un barco colisionaba accidentalmente con una de las torres pudiera producirse un desastre. Así pues, situaron ambas torres del puente fuera del canal de navegación, separadas casi dos kilómetros. Cada torre descansa sobre grava arenosa y rocas blandas que conforman el lecho marino.





3. LOS CAJONES DE ACERO sobre los que descansan las torres, una vez fabricados, se remolcaron a sus respectivos emplazamientos (*abajo, izquierda*). Los cajones, de 80 metros de diámetro y cerca de 70 metros de alto, de doble pared y sin fondo en su parte central, fueron hundidos sobre el lecho marino, que se había excavado antes, llenando de agua su recinto exterior. Posteriormente, una barcaza fabricó y hormigonó bajo el agua, durante tres días y noches, un hormigón especial, desplazando el agua de los cajones y fijándolos en su posición (*abajo, derecha*). Debido a que las corrientes marinas amenazaban con socavar la grava alrededor del cajón (*derecha*), se dispuso alrededor de la base una escollera de rocas, pesando cada una de ellas una tonelada.

El granito, una roca dura que soporta la mayoría de los puentes más largos del mundo, se extiende bajo la costa de la isla de Awaji. Pero el lecho de granito buza rápidamente bajo el estrecho, cediendo su lugar a un estrato superficial de arcilla dura y arenisca. Cerca de la costa de Honshu, el lecho marino está revestido con grava, cubierta en algunos sitios por suelos aluviales blandos y móviles. Ello supone, pues, que las cimentaciones del puente de Akashi Kaikyo tengan que asentarse, no sobre roca dura, sino sobre rocas sedimentarias y grava semicementada.

Los ingenieros situaron las dos cimentaciones extremas del puente sobre terreno seco ganado al mar. Para proyectar las cimentaciones de las torres centrales se extrajeron testigos de los estratos submarinos y así confirmar que el terreno resistía torres de 25.000 toneladas métricas de peso cada una sin que se hundieran ni inclinaran. Se instaló una torre sobre arenisca; la otra, sobre gravas. Con ello, las luces extremas del puente alcanzaron 960 metros cada una, y la central, 1990 metros.

Una luz central tan larga deja al puente a merced de la fuerza destructora del viento. Para evitar que lo último ocurriese, los ingenieros especialistas en aerodinámica construyeron un modelo a una escala cien veces menor que el puente. Lo sometieron a múltiples ensayos en el túnel de viento. El diseño óptimo que tenían que alcanzar debería ser capaz de resistir vientos de hasta 290 kilómetros por hora.

Al tiempo que una draga, operada desde la superficie del agua, excavaba y alisaba el lecho marino, los astilleros fabricaron dos cajones cilíndricos, que son cámaras utilizadas para la construcción bajo el agua. Los cajones miden, aproximadamente, 80 metros de diámetro y 70 metros de altura. Son los mayores que se hayan construido hasta la fecha. Cada cajón tiene una doble pared y, a pesar de un peso muerto de más de 19.000 toneladas métricas, flotaban. Doce remolcadores transportaban cada cajón a su respectivo emplazamiento y, durante las horas escasas de marea baja y de una corriente de agua relativamente lenta, los operarios los hundían, vertiendo agua entre las dos paredes. Los cilindros se asentaban en el fondo marino dentro de una tolerancia de cinco centímetros sobre la posición deseada.

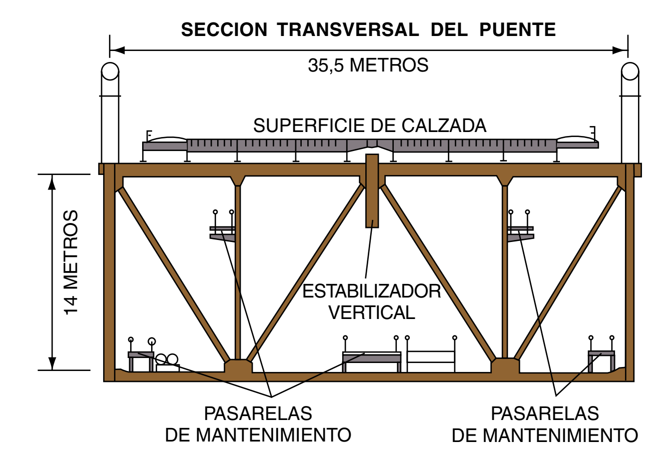
La base del compartimento central del cajón no estaba cerrada, sino que se apoyaba directamente sobre el fondo marino. Los técnicos limpiaron el área aspirando hacia fuera el suelo y las gravas a través de una tubería. Luego, una barcaza fija en la superficie fabricaba hormigón marino, una variedad avanzada de máxima fluidez que, sin embargo, no se disgrega en el agua. Para minimizar imperfecciones, el hormigón se fabricó y vertió sin cesar, durante tres días y sus noches, en la cámara central del cajón. A continuación, los ingenieros drenaron el agua de la cámara exterior, instalaron barras de acero de refuerzo y hormigonaron las paredes. Un año se tardó en los trabajos de hormigonado.

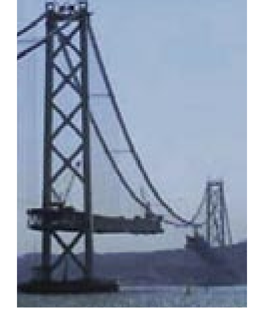
Mientras se vertía el hormigón, los ingenieros vigilaron atentos la estabilidad de las cimentaciones bajo el mar. Cuando una fuerte corriente de marea circula alrededor de una estructura sumergida, las líneas de corriente forman una herradura que socava el suelo y la grava existente en su alrededor. Mediante ensayos de laboratorio y pruebas *in situ*, los expertos encontraron que la socavación ocurre cuando la velocidad de la corriente es superior a dos metros por segundo. Tras sumergir

MECANISMO DE AMORTIGUAMIENTO

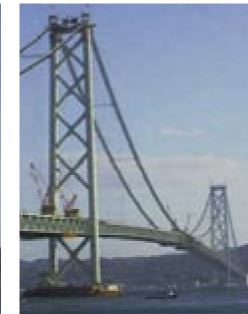
AMORTIGUADOR DE MASA SINTONIZADO

4. LAS TORRES alcanzan 283 metros sobre el nivel del mar. Para su construcción se recurrió a una grúa-torre trepante, que subía las dovelas y las colocaba, luego trepaba sobre su torre y procedía a levantar la siguiente pieza (*izquierda*). Las dovelas presentan una forma cruciforme para resistir la flexión y la torsión. Para lograr una mayor protección frente a las oscilaciones debidas al viento, las torres incorporaban amortiguadores de masa sintonizados, que consisten en péndulos que se mueven en dirección opuesta a la de las torres y que amortiguan su movimiento (*arriba*). Las vigas en celosía del tablero (*debajo*), proyectadas en túnel de viento para resistir vibraciones, se montaron sobre las torres por partes. Una vez aseguradas estas dovelas iniciales, se ensamblaban las siguientes, hasta que los dos extremos de la luz principal se cerraron en agosto de 1996 (*secuencia en la parte inferior*).

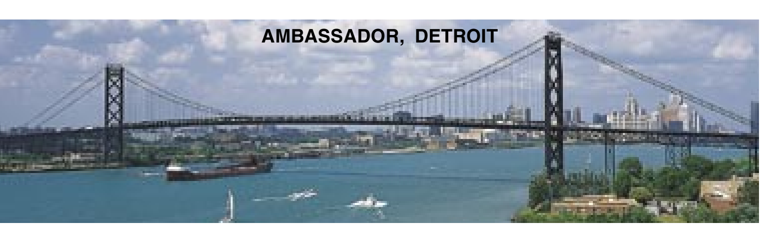


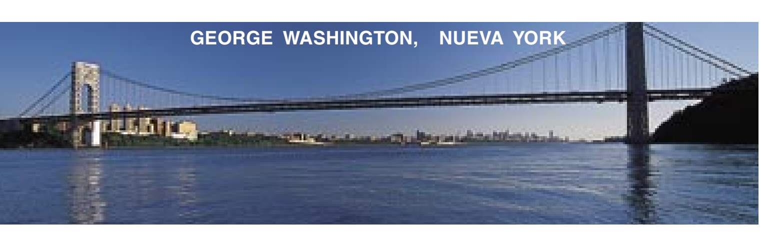


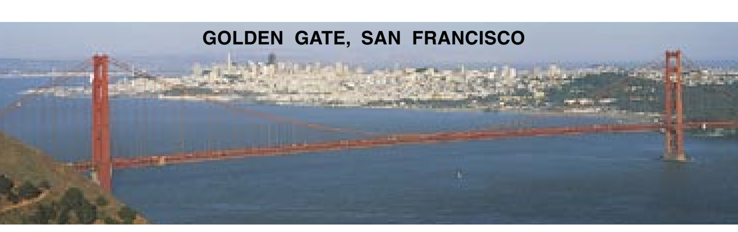


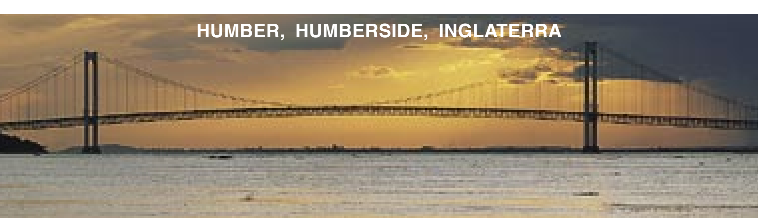




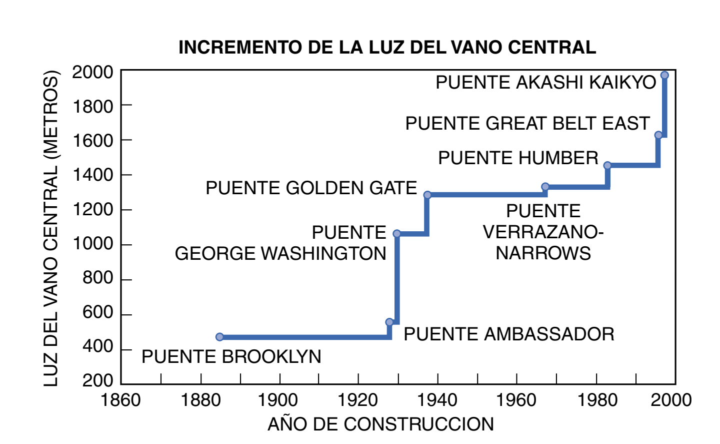


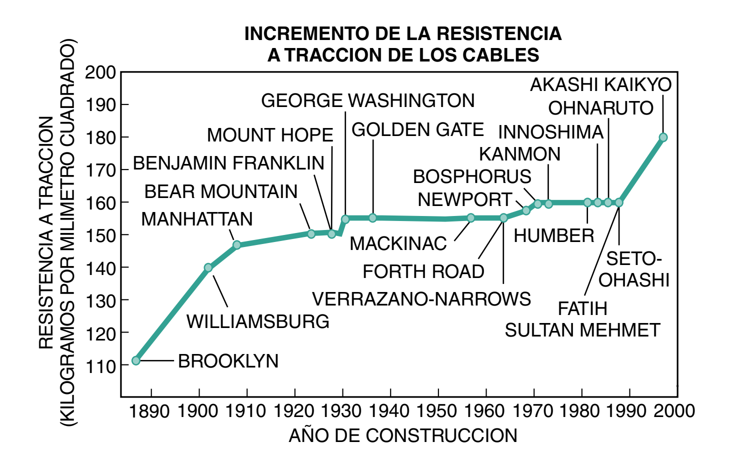




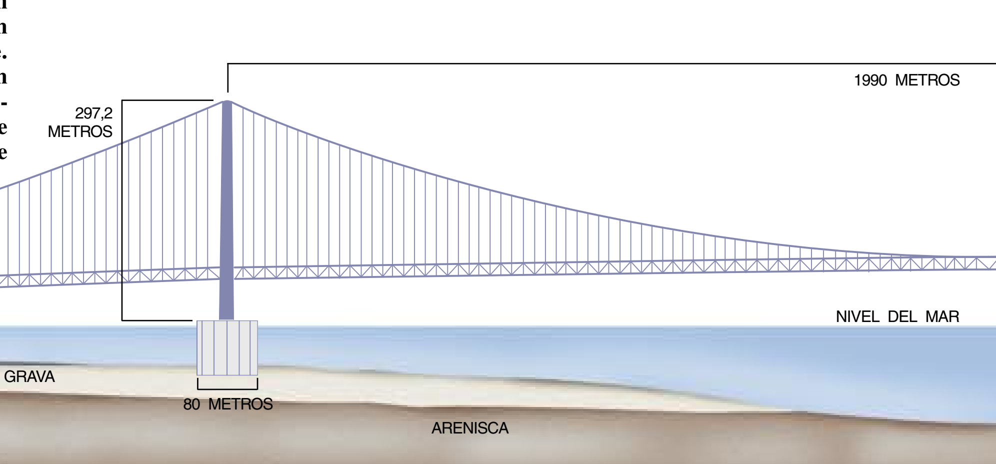


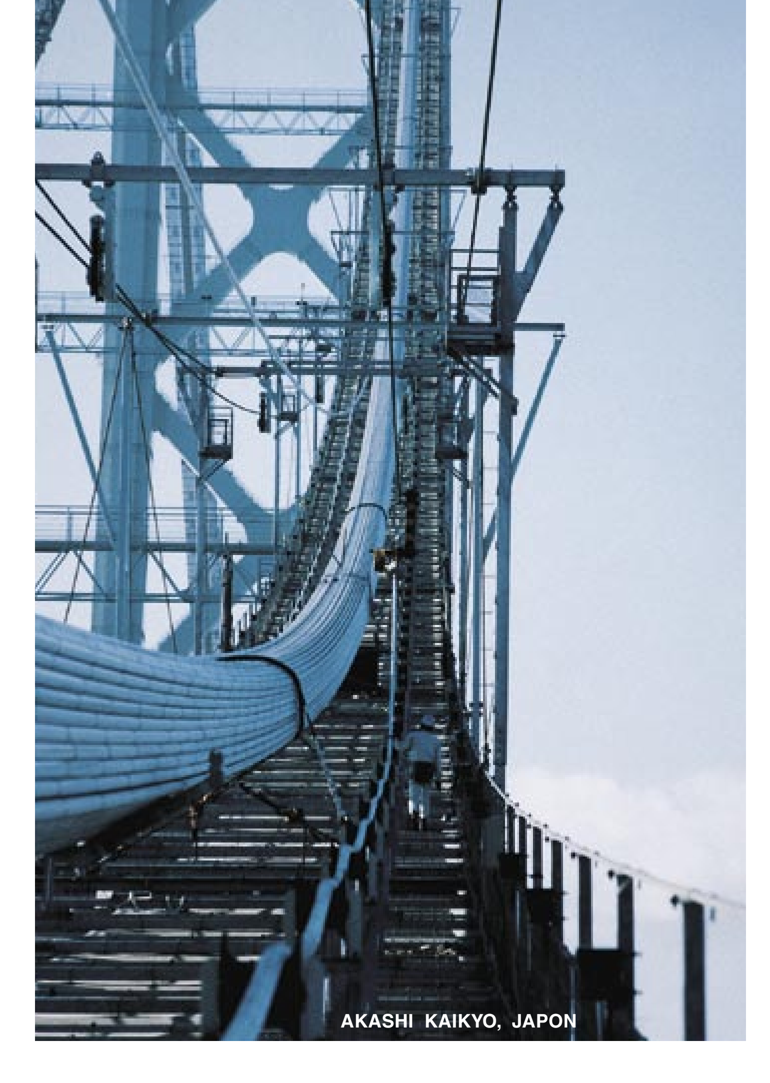
6. LOS PUENTES COLGANTES DEL MUNDO han ido incrementando su longitud desde que se tendió el primero —el puente de Brooklyn— en 1883 (*fotografías de arriba abajo*). El mayor desafío para los ingenieros es suspender el enorme peso del tramo central. La resistencia a tracción de los alambres de los cables se ha incrementado en escalones con la longitud y el peso de los tramos (*gráficos*). El puente de Akashi Kaikyo será el más largo hasta que se levante el puente de Messina, con una luz central de 3,3 kilómetros, proyectado para el año 2006. Unirá Sicilia con la península itálica.





5. HUBO QUE PROCEDER AL TENDIDO del puente de Akashi Kaikyo sin obstruir en ningún momento el tráfico marítimo. Por ello, las torres centrales se construyeron fuera del canal, sobre rocas sedimentarias y gravas semicementadas. En 1995 el terremoto de Kobe abrió una falla en el terreno a 14 kilómetros debajo del puente. Afortunadamente, las vigas del tablero no habían comenzado a montarse, pues de lo contrario hubieran sufrido daños. Las cimentaciones del puente se desplazaron, incrementando la longitud de éste 1,10 metros.



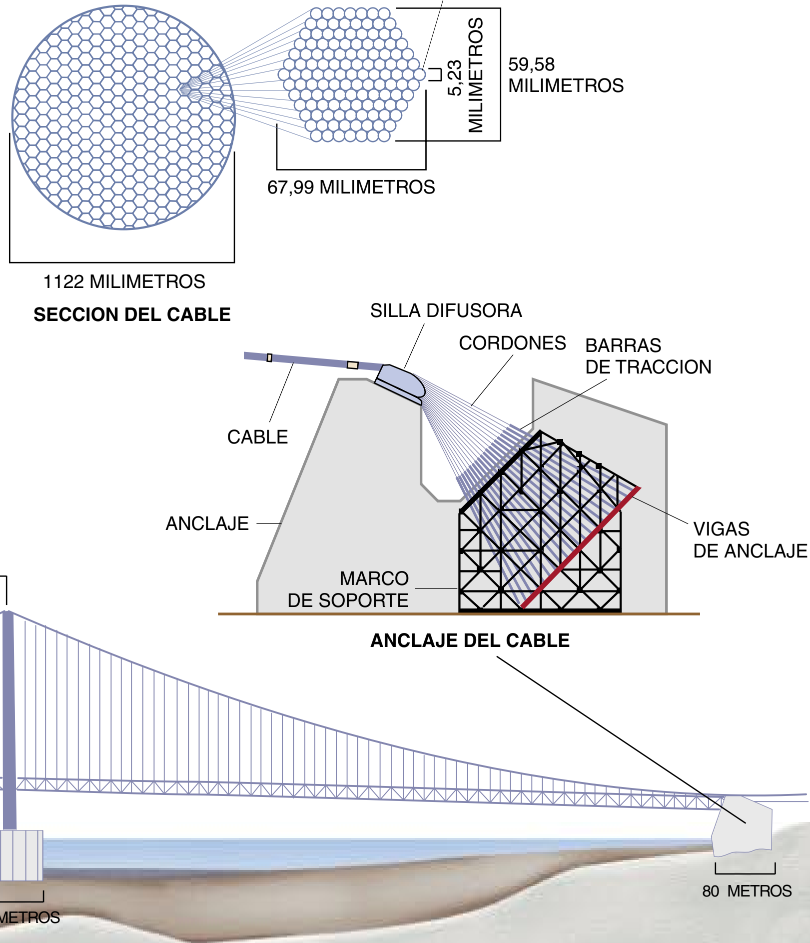


los cajones, se colocaron gaviones alrededor de las cimentaciones. Más tarde, para lograr una protección de larga duración, se dispuso una escollera de rocas, con un peso unitario de una tonelada, sobre un área de extensión dos veces el radio del cajón. Hasta el momento, no se ha producido socavación excepto en los bordes de las capas de protección.

Dos torres

Las torres del puente, 56 metros más altas que las del puente Golden Gate de San Francisco, no tienen par en el mundo. Son muy flexibles y su coronación se inclina fácilmente con el movimiento de los cables. En su interior, cada torre está dividida en 102 pisos por diafragmas horizontales, discurriendo un ascensor por el medio. Las torres vienen a ser, pues, como rascacielos de 102 pisos, con una superficie en planta de 100 metros cuadrados, el tamaño de un apartamento.

Los ensayos en túnel de viento mostraron que los remolinos alrededor de la parte superior de las torres las harían vibrar en una dirección paralela al eje del puente. Para reducir la oscilación, los ingenieros proyectaron cada uno de los fustes de las torres con una sección transversal cruciforme. Dentro de cada fuste alojaron, además, unos amortiguadores de masa sintonizados. Tales dispositivos, usados por primera vez en este puente, contienen péndulos que oscilan en una dirección opuesta a la de la torre, lo que amortigua su movimiento.



7. DOS CABLES, compuestos cada uno por 290 cordones, suspenden el tablero. Cada cordón contiene 127 alambres de acero de alta resistencia (*arriba, derecha*); la longitud total de los alambres daría la vuelta a la Tierra 7,5 veces. Después de tender los cables entre las torres, se instaló una pasarela y se dispusieron cabrestantes para llevar cada cordón a su forma correcta. Los cables se fijaron sobre las cimentaciones costeras por medio de una malla especial, proyectada para asegurar que cada cordón porte una fracción igual del peso total (*abajo, derecha*).

SATOSHI KASHIMA y MAKOTO KITAGAWA han intervenido en el proyecto y la construcción del puente de Akashi Kaikyo. En 1973 Kashima se doctoró en ingeniería por la Universidad de Texas en Austin. Como director general de la Primera Oficina de Construcción de la Sociedad para el puente de Homshu-Shikoku, participó en el emplazamiento de la cimentación del puente. Kitagawa cursó ingeniería en la Universidad de Tokyo. Ha ayudado a proyectar y montar las vigas principales del tablero.

Para fabricar las torres, los proyectistas dividieron cada una en 30 dovelas, cuya altura era de aproximadamente 10 metros. Dividieron luego cada dovela en tres células, cuyo peso no debería sobrepasar 160 toneladas, la capacidad máxima de la grúa.

La torre tenía que ser vertical, admitiéndose una inclinación máxima de 1/5000, lo que significa que su punta debería estar separada menos de seis centímetros de su eje central vertical. Para obtener esta precisión, los técnicos ensamblaban provisionalmente las dovelas prefabricadas en taller, luego amolaban y pulían sus planos de contacto hasta alcanzar la planeidad requerida. Después, separaban las dovelas y las transportaban a la obra.

La torre se montó mediante una grúa trepante. Situada una dovela, la grúa se izaba a sí misma hasta el siguiente nivel y levantaba una nueva dovela. El dispositivo, innovador, minimizaba el uso de andamiajes temporales, amén de ahorrar en tiempo y costo de construcción.

La siguiente fase consistía en la colocación de los cables. Los alambres habituales, con una resistencia a tracción de 160 kilogramos por milímetro cuadrado, resultaban demasiado débiles. A partir de estudios metalúrgicos los ingenieros pusieron a punto una aleación de acero con silicio para alcanzar una resistencia de 180 kg/mm^2. Merced a ello, pudo emplearse sólo un cable a cada lado para colgar el tablero del puente. Esta simplificación de la estructura posibilitó la reducción de su peso total y del tiempo de construcción.

Para colocar el cable sin entorpecer la navegación por el canal, un helicóptero tendió un cable guía a través del estrecho. Usando este cable guía para subir los cables más potentes, los operarios montaron una pasarela. Unos cabrestantes situados sobre ella tiraban de cada cordón hasta ponerlo tirante. A media noche, cuando el calor del sol no afecta al acero, los ingenieros ajustaban las longitudes de los cordones de suerte tal que todos y cada uno soportaran igual peso.

El 17 de enero de 1995, acabados de montar los cables, se produjo un terremoto de magnitud 7,2 que sacudió una extensa área cerca del lugar de la construcción. Su epicentro distaba cuatro kilómetros. El sismo devastó la ciudad de Kobe y dañó carreteras, ferrocarriles y otras infraestructuras existentes en la zona. Después de revisar la región, los geólogos determinaron que se había formado una nueva falla cerca del puente, a 14 kilómetros de profundidad; por culpa de ella se movieron las cimentaciones, ampliando la luz central del puente 80 centímetros y el vano lateral del lado de Awaji, 30 centímetros.

En el proyecto del puente los ingenieros habían introducido en sus previsiones los efectos de un terremoto de magnitud 8,5 causado por un movimiento de la placa del Pacífico, que se halla a 150 kilómetros. Además, habían simulado sobre el puente el estado tensional producido por un fuerte viento y un terremoto, ambos con un período de retorno de 150 años. Pero nadie pensó en que las cimentaciones podrían moverse a resultas de la aparición de una nueva falla en el subsuelo.

Sólo unir

Afortunadamente, las torres y los cables no sufrieron daño, ajustándose estos últimos sin problemas a la nueva longitud incrementada. Pero hubo que volver a proyectar el tablero y añadir 1,10 metros a la longitud del puente; un mes más tarde, se reanudó la construcción. Mirado en retrospectiva, fue una suerte que el terremoto ocurriera antes de que el puente estuviera terminado; de no haber sido así se hubieran resentido algunos elementos, como las juntas de dilatación que se colocaron más tarde. El sismo relajó las tensiones de la corteza terrestre, lo que significa una menor probabilidad de que tales accidentes se repitan en un futuro próximo.

Durante el proyecto del tablero del puente, los ingenieros encontraron que una particular oscilación de torsión, excitada por el viento, provocaba un problema importante. Si no se amortiguaba esa resonancia, podría derrumbarse el puente. Utilizando otra vez el túnel de viento, proyectaron un tablero en celosía que no mostrara esta resonancia e instalaron placas verticales estabilizadoras bajo la mediana del puente para reducir las oscilaciones. También demostró ser efectiva la colocación de entramados perforados en la parte central y en ambos bordes de la superficie del tablero.

Con una grúa flotante de 3500 toneladas, en junio de 1995 se izaron las vigas en celosía del tablero sobre las torres. Luego, los elementos de la celosía más pequeños, preensamblados en trozos de 28 metros, se transportaron hasta las partes frontales de las vigas principales y conectados a éstas. Así, avanzaron ambos extremos del puente hasta encontrarse, lo que sucedió en agosto de 1996.

Los obreros están ahora realizando los acabados finales: tendido de líneas eléctricas, pavimentación de la calzada, etc. Cuando se inaugure para el tráfico de aquí a dos meses, el pueblo japonés podrá servirse de esa imponente obra pública durante muchas décadas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CABLE STRUCTURES. H. Max Irvine. Dover Publications, 1992.

SUPER SPAN. *Japan Economic Journal* (*Nihon keizai shimbun*), vol. 31, n.º 1596, páginas 13-19; 22 de noviembre, 1993.

CABLE SUPPORTED BRIDGES: CONCEPT AND DESIGN. Segunda edición. Niels J. Gimsing. John Wiley & Sons, 1997.

FEASIBILITY STUDY ON DUAL CABLE SUSPENSION BRIDGES. N. Take, M. Kitani, H. Konishi y N. Nishimura en *Technology Reports of the Osaka University* (*Osaka Daigaku kogaku hokoku*), volumen 47, n.º 2267/82, páginas 79-88, 1997.

PROPOSAL FOR SUPER-LONG SPAN SUSPENSION BRIDGE AND ITS AERODYNAMIC CHARACTERISTICS. K. Matsuda, Y. Hikami y M. Tokushige en *IHI Engineering Review* (Tokio), vol. 30, n.º 3, páginas 93-100, 1997.



Los edificios más altos del mundo

Las torres gemelas de Petronas, en Kuala Lumpur, capital de Malasia, se erigen como símbolo económico y cultural de la nación

Cesar Pelli, Charles Thornton y Leonard Joseph

El impulso por construir tan alto como sea posible parece ser un rasgo característico de la cultura humana. Desde la gran pirámide de Cheops hasta la torre de Babel, muchas civilizaciones intentaron levantar estructuras que se irguieran por encima de las de su entorno. Los zigurats mesopotámicos, las pagodas chinas y los minaretes musulmanes se han convertido en símbolos de las creencias religiosas, en torres que se alargan hasta el cielo.

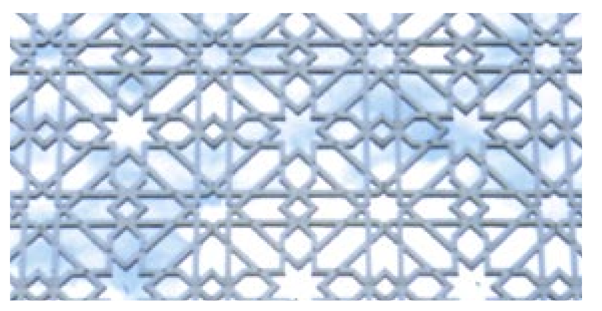
El obelisco moderno es el rascacielos. Desde hace más de un siglo, arquitectos e ingenieros han aplicado sus conocimientos prácticos y teóricos a las técnicas de construcción vertical para transformar el aspecto de las ciudades. Los primitivos rascacielos tomaron prestado el modelo de las columnas griegas y de las torres renacentistas. El movimiento de modernidad que imperó después de la Segunda Guerra Mundial huyó de las inclinaciones simbólicas: sus estructuras rectangulares de cubierta plana se denominaron, sin embargo, edificios en altura y no rascacielos. Recientemente, los arquitectos han reavivado de nuevo el interés por los edificios altos como emblema cultural. Ejemplos preeminentes de esta tendencia son los edificios más altos del mundo, las torres gemelas de Petronas, que se elevan sobre la ciudad de Kuala Lumpur, capital de Malasia. (Petronas es el nombre de la compañía estatal de petróleos.)

Los pináculos de las estructuras de 88 plantas alcanzan 451,9 metros. Los edificios, conectados por un puente aéreo que se tiende entre sus pisos 41 y 42, son algo más que un mero complejo de oficinas. Estos edificios, recientemente terminados, se alzan como un símbolo del desarrollo económico de Malasia, a la vez que ponen de relieve las tradiciones islámicas de esta nación del sudeste asiático de 19 millones de habitantes.

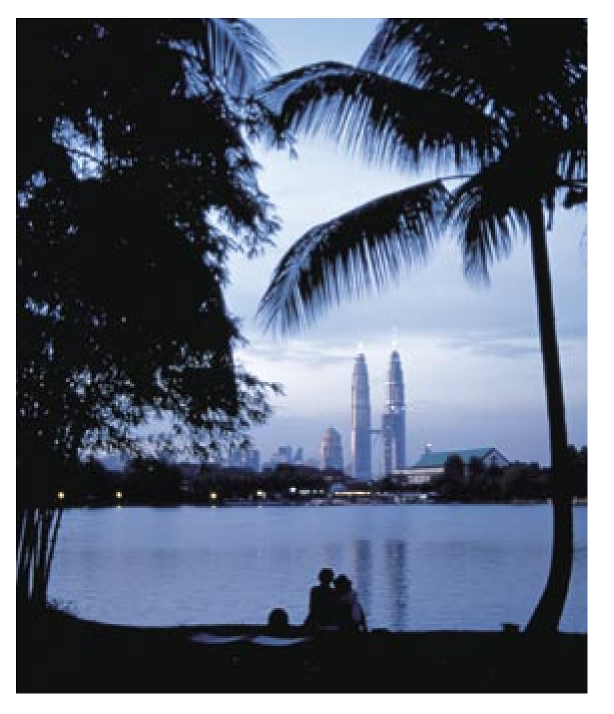
Cada planta tiene una forma estrellada en la que alternan esquinas circulares y cuadradas, según un diseño basado en el arte islámico. La superficie facetada de los paramentos exteriores repite el mismo patrón. El proyecto es una pieza clave dentro de lo que Mahathir Mohamad, primer ministro de Malasia, llama "Wawasan" ("Fantasía") 2020, un minucioso plan para el desarrollo del país que abarca diversos proyectos más de gran infraestructura.

Cada torre tiene 213.750 metros cuadrados de superficie útil (equivalente a 48 campos de fútbol). Además de oficinas, el espacio se utiliza para un centro de exposición sobre el petróleo, una galería de arte y salas de conferencias equipadas con lo último en comunicación multimedia. Ambos edificios forman parte de un complejo mucho mayor, el centro de la ciudad de Kuala Lumpur, Fase I, y se han construido en una esquina del antiguo emplazamiento de un hipódromo, el club Selangor Turf. El complejo comprende, además, 140.000 metros cuadrados para pequeños comercios y actividades de ocio, 2600 metros cuadrados para una sala de conciertos de 850 butacas, 251.000 metros cuadrados destinados a aparcamiento subterráneo para 5000 vehículos, y dos torres de oficinas menores con 186.000 metros cuadrados de superficie.

El responsable de la organización del complejo es Kuala Lumpur City Centre Holdings Sendirian Berhad, una sociedad participada por Petronas, que es, además, su principal ocupante. El coordinador del proyecto es Kuala Lumpur City Centre Berhad. Lo que sigue es una descripción del conjunto de decisiones arquitectónicas y de ingeniería que comenzaron con un concurso de proyectos en 1991 y continuaron hasta la terminación de los remates de las torres.



1. LOS MOTIVOS ISLAMICOS influyeron en el proyecto arquitectónico de las torres de Petronas, que se divisan en la fotografía inferior desde un lago cercano.



PROYECTO ARQUITECTONICO

La puerta de Malasia

El proyecto arquitectónico de las torres de Petronas comenzó, como la mayoría de los macroproyectos, con un concurso internacional. Ocho firmas de Europa, Asia y Estados Unidos respondieron a la invitación del propietario y organizador. Todos los arquitectos trabajaron a partir de un informe bastante escueto que describía los requisitos —un proyecto general para un centro comercial y espacios públicos— y un programa más detallado para dos torres que ocuparía la compañía Petronas en la esquina nordeste de un complejo de 40 hectáreas.

Las torres, según se especificaba en las bases del concurso, deberían simbolizar una puerta de entrada del nuevo centro cívico. Crear "un espacio que la gente identificara como único en Kuala Lumpur y en Malasia". Nunca se especificó que las torres fueran los mayores edificios del mundo; sólo que deberían ser bellas.

El concurso duró sólo un corto período de tiempo durante el verano de 1991. En el intervalo de tres semanas, cada estudio tuvo que preparar dibujos, maquetas y perspectivas escenográficas para enviarlas a Kuala Lumpur. El departamento técnico de los organizadores empleó dos semanas para revisar las propuestas. Posteriormente, en agosto, cada concursante tuvo que realizar múltiples presentaciones de sus proyectos ante audiencias que incluían al organizador y primer ministro Mahathir. Estas sesiones se dedicaban tanto a aspectos técnicos y económicos como a cuestiones estéticas y filosóficas.

Al final de ese mes Cesar Pelli & Associates, la firma de arquitectura de New Haven, recibió la noticia de que había sido elegida para diseñar la primera fase del proyecto para el centro de la ciudad de Kuala Lumpur, que incluía las torres de Petronas. Nunca se sabe con certeza por qué resulta elegida una propuesta concreta. En este caso, el cliente indicó que, en punto a arquitectura, Cesar Pelli & Associates habían resuelto todos los detalles prácticos y, lo que era más importante, la propuesta satisfacía el deseo de un proyecto con auténtica identidad malaya.

Después de esta decisión, se formó un equipo que incluyó, entre otros, a Thornton-Tomasetti, ingenieros de estructuras; Flack & Kurtz, ingenieros mecánicos; Adamson Associates, arquitectos de obra, y Balmori Associates, diseñadores paisajistas.

Un total 16 de empresas colaboraron en la realización de la obra. Este número no es insólito para un proyecto de tamaña complejidad. Cuanto más alto es un edificio, mayores son las exigencias de funcionalidad, estructura, eficacia y economía. La amplitud del equipo también respondía al requisito de que las empresas occidentales, expertas en el proyecto y la práctica constructiva de edificios muy altos, pudieran colaborar estrechamente con profesionales malayos para hacerles partícipes de su dominio de la técnica.

PROYECTO TECNICO

Islas en el cielo

Los principios básicos de ingeniería en el proyecto de edificios en altura dan la sensación de ser engañosamente simples. Los forjados y las vigas se tienden de un soporte a otro creando espacio libre que puede distribuirse en áreas de trabajo definidas. Los soportes absorben las cargas del edificio conduciéndolas verticalmente hasta la cimentación. Ciertas partes del sistema estructural también deben proporcionar rigidez frente a la estabilidad lateral. Es el caso, por ejemplo, de una pantalla contra esfuerzos horizontales que puede discurrir a través de cierto número de plantas para hacerlas solidarias entre sí frente a las acciones del viento y otras fuerzas dinámicas, como terremotos.

Las exigencias de la estructura, sin embargo, se incrementan con la altura. Definiendo el soporte tipo como el resultante del cociente entre la suma total de las cargas que afectan al edificio y el número total de pilares contenidos en él, se puede calcular que el soporte tipo correspondiente a un edificio de 40 pisos acusa una carga equivalente a la de 23 plantas juntas. En uno de 80 pisos, un soporte tipo de sus primeras 40 plantas absorbe una carga media equivalente a 80 plantas. Al duplicarse la altura, se multiplica por más de tres la carga aplicada debido a los efectos compuestos a que da origen el peso propio del edificio.

Conforme crece la altura, la superficie expuesta a la acción del viento —una magnitud crítica en el proyecto de edificios en altura— también se incrementa, y debe controlarse el desplazamiento lateral de las plantas superiores. Al duplicarse la altura de un edificio, la oscilación lateral producida por el viento se multiplicará por 16, a menos que se aumente sustancialmente la rigidez de la estructura.

Al suministrar a los pisos superiores climatización, agua, electricidad, líneas de comunicación e instalaciones sanitarias se ocupa un espacio interior muy valioso; el local necesario para la ubicación de estos servicios puede crecer desproporcionadamente. Se necesitan poderosas bombas de impulsión en la base para subir el agua hasta lo más alto. Las secciones de los tramos inferiores de los conductos de agua y aire acondicionado están sometidas a grandes presiones y sólo se consigue algún aligeramiento de las mismas con la construcción de tanques de almacenamiento de agua e intercambiadores de calor distribuidos por todo el edificio.

Por encima de los 30 metros no puede abordarse la extinción de incendios ni la evacuación de personas mediante coches de bomberos con escalera situados en la calle. Los rociadores, alarmas, sistemas de detección de humos y áreas de protección contra el fuego (zonas con un suministro independiente de aire) revisten, pues, vital importancia. Los métodos tradicionales de construcción son incompatibles con los edificios en altura; grúas, plataformas de trabajo y encofrados (recipientes de acero donde se vierte el hormigón) deben ir ascendiendo conforme avanza la construcción del edificio. El tiempo invertido para subir operarios, hormigón, acero y vidrio puede afectar las previsiones del programa. Los contratistas, en efecto, deben planificar el proyecto como si de una isla en el cielo se tratara.

A pesar de los impedimentos, los edificios continúan creciendo cada vez más, aproximándose ya a los límites prácticos de altura. El hormigón de alta resistencia permite conformar sólidos elementos estructurales, reduciendo así las restricciones que imponen el peso y tamaño de los soportes al proyecto de los edificios. Los nuevos aceros resistentes pueden utilizarse también allí donde las limitaciones por el peso resultan críticas. Son necesarias amplias cimentaciones para conseguir estabilidad contra el viento y muchas nuevas torres son, de hecho, megaestructuras que ocupan varias manzanas.

El principal límite a la altura estriba en la propia fisiología humana, no en las dificultades estructurales. Las variaciones de presión y la duración del transporte en cualquiera de los ascensores de largo recorrido imponen un coste de “intercambio vertical” a los ocupantes.

PROYECTO ARQUITECTONICO

Una estrella de muchas facetas

El encaje de las torres de Petronas en la idiosincrasia de Kuala Lumpur y de Malasia obligaba a reconsiderar el carácter de los rascacielos tradicionales para que no evocasen las obligadas connotaciones occidentales. La forma de las torres tiene su origen en la tradición islámica, en la que los motivos geométricos asumen gran importancia simbólica.

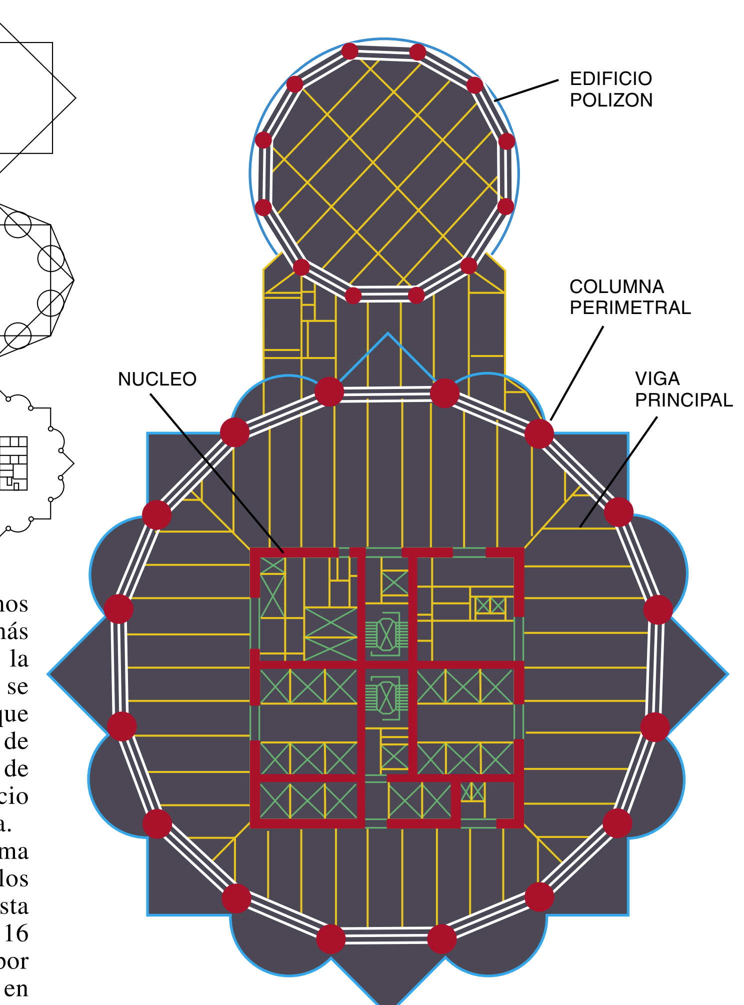
Para el concurso, Cesar Pelli & Associates propuso, por perímetro del edificio, una estrella de 12 puntas, proporcionándole así tanto una forma armoniosa, como una planta muy aprovechable. El primer ministro Mahathir, sin embargo, sugirió que podría haber otros motivos más representativos de un proyecto islámico. Después de adjudicado el contrato, buscamos motivos tradicionales y concluimos que el proyecto más común era la estrella de ocho puntas: realizada por la superposición de dos cuadrados girados, suposición que se confirmó mediante un dibujo sugerido por Mahathir, que sugirió dos cuadrados entrelazados. Pero una estrella de ocho puntas produce una planta inadecuada; el muro de cerramiento se aproxima demasiado al núcleo del edificio reduciendo flexibilidad en el uso del espacio en planta.

Estudiamos muchas variantes y propusimos una forma con ocho semicírculos superimpuestos en los ángulos internos de la estrella de ocho puntas, creándose de esta forma una figura de 16 lóbulos. Cada uno de los 16 ángulos internos del edificio se encontraría ocupado por un soporte estructural, generándose así una superficie en planta completamente libre de columnas.

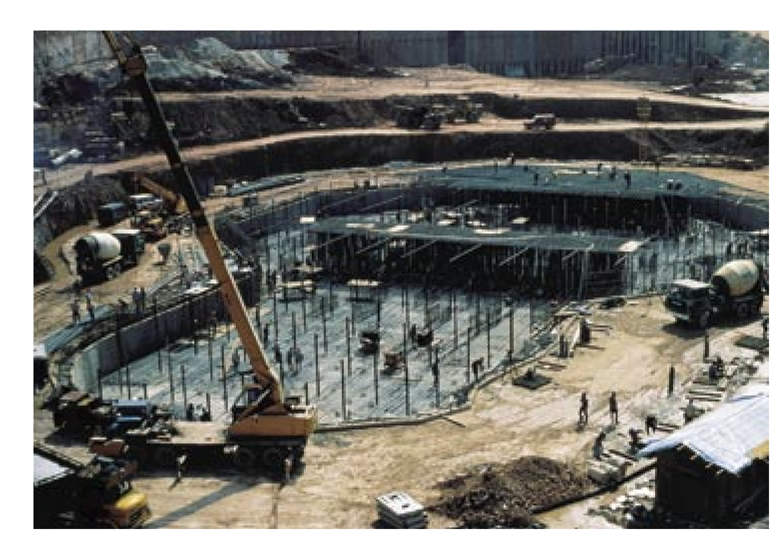
Casi al mismo tiempo, comenzó el trabajo de desarrollo del núcleo, un cuadrado hueco formado por muros en el centro del edificio que proporciona buena parte del soporte estructural. El núcleo, que contiene, además, ascensores, escaleras, conductos de instalaciones, locales de ventilación y aseos, es la clave para el buen funcionamiento de un edificio en altura. Su proyecto debe basarse en las necesidades de los potenciales usuarios y en la distribución de cada planta. El objetivo era satisfacer estas demandas con un alto “coeficiente de rendimiento”, parámetro que describe la proporción entre la superficie útil y la construida de una planta. El coeficiente de rendimiento medio de una planta de oficinas en las torres de la compañía Petronas se sitúa entre el 76-77 por ciento, lo que representa un buen porcentaje para un edificio tan alto.

La realización de un núcleo compacto requiere una serie de cuidadosas decisiones. Para proporcionar un servicio de ascensores eficiente, cada hueco acomoda múltiples cabinas. La cantidad de conductos dedicados al servicio rápido para trasladar pasajeros hasta los pisos superiores se reduce mediante un sistema de lanzaderas de acceso directo. Los visitantes a la mitad superior de los edificios hacen transbordo a media altura a dos cabinas “locales”, que están situadas una sobre la otra. La capacidad en las horas punta todavía se incrementa más gracias a cabinas de dos pisos.

La elección del vidrio para las ventanas y el diseño de los parasoles —tubos de acero que protegen contra el sol tropical— afectan tanto a la imagen global del edificio, como al tipo de iluminación de las oficinas, a las necesidades de equipamiento para suministro de aire acondicionado y, en última instancia, a los costes anuales de mantenimiento.



2. LA FORMA ESTRELLADA caracteriza la planta de las torres de Petronas. La idea original de la planta consistía en dos cuadrados superpuestos (*arriba a la izquierda*), creando una estrella de ocho puntas. Se modificó —situando ocho semicírculos en los ángulos interiores de las puntas de la estrella (*detalle central*)— para crear mayor espacio útil en planta. El proyecto final contenía 16 protuberancias: ocho puntas y ocho lóbulos (*detalle inferior*). El núcleo, consistente en un cuadrado hueco de muros, por donde discurren ascensores, conductos de instalaciones y otros servicios (*arriba*), conecta con las vigas principales que sobrepasan el perímetro de las columnas. Un edificio menor, o polizón, que se muestra como un apéndice superior en planta, llega hasta el piso 44 de la torre.



PROYECTO TECNICO

Sobre suelo de Kenny Hill

Kuala Lumpur se encuentra circundada por montañas bajas. En el interior de la ciudad, no obstante, sólo una pequeña colina interrumpe la llanura del terreno. El emplazamiento es un campo alisado de césped. Sin embargo, el ingeniero geotécnico del proyecto, Ranhill Bersekutu Sendirian Berhad, sabía por experiencia que el estrato rocoso inferior podía ser muy irregular.

Expuesto durante millones de años a la acción atmosférica, el lecho de roca caliza de esta región contiene cavernas, picachos, gargantas y escarpaduras. Los sedimentos de la erosión fueron colmatando los valles; estos estratos inferiores se metamorfosearon en roca débil que meteorizó, con el tiempo, en un tipo de suelo duro existente en Malasia, denominado Kenny Hill.

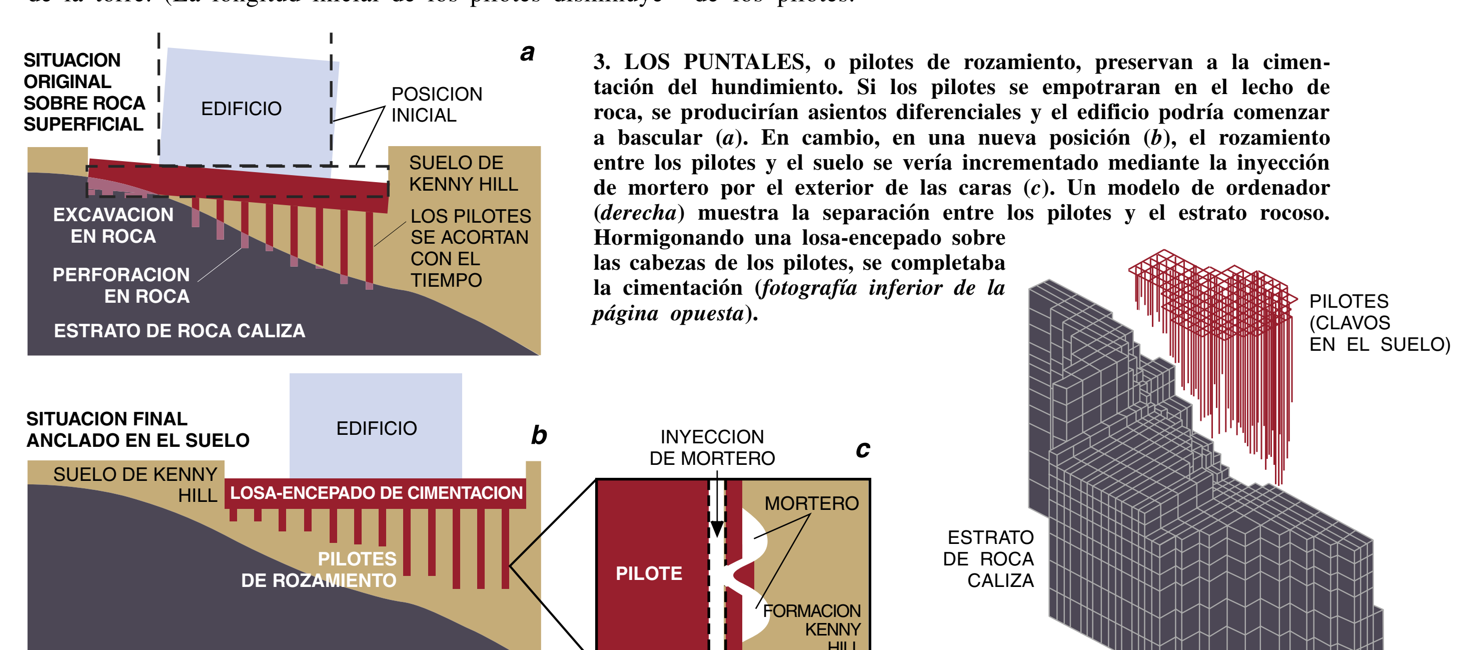
Las 300.000 toneladas de peso de cada torre podrían repartirse sobre una gran placa de hormigón que recibe el nombre de losa de cimentación. Pero, en este caso, cada torre ejercería 1140 kilopascals de presión, más del doble de la capacidad resistente del suelo de Kenny Hill y suficiente para destruir la losa. Para evitar tal posibilidad, la idea inicial para la cimentación se basaba en la perforación de pozos circulares de gran tamaño rellenos de hormigón, y, en número de dos, debajo de cada columna. Además de éstos, había otros, de iguales características, que se situarían debajo de los muros del núcleo. Todos ellos irían atravesando previamente el suelo antes de hincarse en el estrato de roca.

El equipo de proyecto se enfrentó con un dilema: el estrato de roca que caía debajo de ambas torres mostraba un comienzo somero, a 15 metros bajo la superficie, que se iba inclinando gradualmente hasta alcanzar una profundidad superior a los 180 metros. Ahora bien, se necesitaba una profundidad mínima de excavación de 21 metros para la ubicación del basamento, lo cual ocasionaba su penetración en el estrato de roca por uno de sus extremos. En el otro extremo, por el contrario, sería necesaria una mayor excavación para hincar los pilotes profundamente, a través del suelo, hasta el lecho de piedra. La ejecución de los pilotes en el extremo profundo podía ser arriesgada, lenta y costosa; además, el inevitable acortamiento de los pilotes sería diferente para cada pozo de cimentación, produciendo un basculamiento inadmisible de la torre. (La longitud inicial de los pilotes disminuye a causa de las cargas extra impuestas por la adición de pisos superiores y por las sobrecargas gravitatorias de uso, tales como las producidas por los movimientos de enseres y residentes.) Y aunque los acortamientos de este tipo podrían tener solución técnica, el proceso requeriría una excavación adicional y otras medidas que incrementarían el costo.

Afortunadamente, el lugar era lo bastante amplio como para que se considerara el cambio de ubicación de la cimentación. Desplazando ambas torres 60 metros al sudeste se disponía al menos de 55 metros de capa de terreno bajo las bases de cada torre. En vez de hundir los pilotes en el estrato rocoso, se anclarían en el terreno. La nueva situación proporcionó más espacio entre las torres y las calles cercanas, lo que mejoraba el flujo de tráfico y dejaba sitio para calles de servicio y rampas de entrada a los aparcamientos.

En esta nueva ubicación, las torres se asentaban sobre bancadas opuestas de un terraplenado sobre un estrato rocoso que yacía de 80 a más de 180 metros por debajo. Una losa de cimentación de hormigón repartiría el peso del edificio y lo conduciría hacia pilotes barrenados de 1,3 metros de diámetro, elementos más esbeltos que los pilotes proyectados primitivamente. Estos nuevos pilotes transferirían el peso de la torre al suelo más gradualmente de lo que lo haría una losa en solitario. El rozamiento entre la superficie del pilote y el terreno circundante impediría el hundimiento de estos soportes de cimentación. El asentamiento se produciría en la zona de suelo comprendida entre el extremo de los pilotes y el estrato de piedra. Variando la longitud de aquéllos de tal forma que todos sus extremos mantuvieran, poco más o menos, la misma distancia con respecto a la pendiente rocosa, resultarían asientos uniformes, evitándose con ello el basculamiento de la cimentación.

Cada cimentación quedó, al final, formada por 104 puntales (pilotes rectangulares hormigonados *in situ* de hasta 1,2 por 2,8 metros de sección), llevados a profundidades de hasta 125 metros. La construcción de estos puntales se realizó mediante equipos que hacían descender una jaula de armaduras de acero en cada pozo de cimentación que, posteriormente, se rellenaba de hormigón. El rozamiento entre los pilotes y el suelo se incrementó con inyecciones de mortero: una mezcla de arena y cemento bombeada hacia abajo a través de tuberías empalmadas y situadas junto a la cara exterior de los pilotes.



3. LOS PUNTALES, o pilotes de rozamiento, preservan a la cimentación del hundimiento. Si los pilotes se empotraran en el lecho de roca, se producirían asientos diferenciales y el edificio podría comenzar a bascular (*a*). En cambio, en una nueva posición (*b*), el rozamiento entre los pilotes y el suelo se vería incrementado mediante la inyección de mortero por el exterior de las caras (*c*). Un modelo de ordenador (*derecha*) muestra la separación entre los pilotes y el estrato rocoso. Hormigonando una losa-encepado sobre las cabezas de los pilotes, se completaba la cimentación (*fotografía inferior de la página opuesta*).

PROYECTO TECNICO

Monolitos de hormigón

Los primeros edificios en altura se realizaron con piedra, ladrillo u hormigón tradicional. De ello derivaba la exigencia de pesados muros y columnas enormes. El acero superó estas limitaciones y comenzó la era de los rascacielos. Pero los avances en la técnica del hormigón volvieron a hacer atractivo el empleo de este material estructural. La adición de microsílice y otros componentes en la masa del hormigón de base incrementa su resistencia, lo que permite obtener elementos estructurales de menores dimensiones. También existen otros productos que confieren al hormigón propiedades mejores, como los agentes superplastificantes que lo hacen más fácil de bombear. Cuando el agua reacciona químicamente con las partículas de cemento y otros componentes para formar el hormigón, se desprende calor de hidratación, pero una cantidad excesiva de calor de esta naturaleza puede fisurarlo. Este problema se evita sustituyendo parcialmente el contenido inicial de cemento por cenizas volantes.

El hormigón resultaba ideal para los soportes y los muros de los núcleos de las torres debido a su familiaridad para los constructores locales. Se le puede elevar al punto de trabajo utilizando émbolos o bombas de impulsión; es fácil de moldear en formas complejas. El hormigón ayuda a amortiguar la natural tendencia de cualquier estructura en altura a oscilar ligeramente con el viento; su capacidad para atenuar vibraciones dobla la del acero. La amplitud de estas oscilaciones —un ciclo que se sucede cada nueve segundos en las torres— se hace tolerable gracias a la masa de hormigón. Ambas características reducen la respuesta del edificio al viento.

La resistencia lateral y la rigidez son esenciales en los edificios en altura. Las estructuras más bajas utilizan exclusivamente su núcleo central como columna vertebral estructural, pero el compacto núcleo de las torres de Petronas podría tener no más que la mitad de la resistencia y rigidez necesarias para hacer frente a las deformaciones instadas por el viento y otras fuerzas. La resistencia necesaria se alcanzaba, entonces, mediante una combinación de los muros que conforman el núcleo y una estructura perimetral de vigas y columnas de hormigón, junto con un entramado de arbotantes (vigas rígidas tendidas desde el núcleo hasta el perímetro).

Para la fachada se utilizan paneles modulares de un piso de altura, cada uno de 4 metros de alto por 1,4 metros de ancho, que se unen mediante juntas de lengüeta y ranura para su rápida ejecución. Los parasoles de acero inoxidable y vidrio tintado con autolimpieza por goteo como elementos de acabado, se adaptan bien al emplazamiento tropical y proporcionan una envolvente ligera con una vigorosa textura visual.

El ahusamiento progresivo hacia la cima reduce el área expuesta a los vientos más fuertes de las alturas superiores. Las columnas de los pisos más altos están retranqueadas (desplazadas a las proximidades del núcleo), proyectándose hacia el interior. La presión del viento en torres lobuladas de forma redondeada es menor que en una torre rectangular, aunque mayor que en una superficie cilíndrica lisa. El estriado del paramento exterior de los edificios crea pequeñas áreas de turbulencia que producen una amplificación de los vórtices de viento capaces de incrementar las oscilaciones laterales. También se descubrió, por los estudios en túnel de viento, que las corrientes de aire circulantes en el vacío comprendido entre ambas torres incrementaba el movimiento de los edificios.

Kuala Lumpur tiene un clima benigno para los edificios en altura. No es un área marcada por la actividad sísmica, ni se encuentra bajo la influencia de huracanes o tifones. Las tormentas tropicales traen consigo fuertes lluvias con aparato eléctrico, pero no vientos excepcionales.

En los edificios altos, es el tiempo necesario para construir una planta el que determina el programa de actividades. Los contratistas agilizaron dicho programa. Así, para construir los muros del núcleo, elevaron mediante gatos, plataformas de trabajo y encofrados (cajas de acero para verter el hormigón de los soportes) así como equipos de trabajo completos. Las fases en la construcción de forjados de estructura de hormigón —preparación, encofrado (presentación de armaduras), vertido, acabado y curado— exigen más tiempo de realización que los soportes de los edificios; ello podría decelerar la marcha del trabajo. Para evitar este desequilibrio de tareas, los operarios sujetaban las vigas de acero entre el núcleo y las columnas, colocaban una chapa plegada de metal sobre aquéllas y después vertían encima una capa de hormigón más delgada que el espesor total del forjado.

4. LOS OCHENTA Y OCHO PISOS terminan en un alto mástil de 63,2 metros (*izquierda*). Las columnas en los pisos superiores se retranquean, permitiendo el estrechamiento en la cima del edificio, lo que reduce el área expuesta a los vientos existentes a grandes alturas (*fotografía superior*). El observador da una idea de la escala del edificio (*fotografía inferior*).



PROYECTO ARQUITECTONICO

Destacando el vacío

Quizá la más importante de las decisiones arquitectónicas fue el hacer de las torres unos rascacielos dotados de siluetas distintivas. Cesar Pelli & Associates también adoptó la decisión, poco usual, de disponer la pareja de torres según una composición simétrica. De acuerdo con las tendencias modernas, los arquitectos se esfuerzan por emparejar los rascacielos en composiciones asimétricas. Por lo general, recurren a la estrategia de dar diferentes alturas a las dos estructuras. Si es la misma, las disponen en diagonal, una con respecto a la otra: el World Trace Center es un notable ejemplo de ello. Semejante a una escultura, el edificio resultante se convierte en un objeto exento, situado en un espacio indeterminado. Como tal, elude la expresión simbólica.

En su proyecto definitivo, que rompe con la tradición moderna, las torres son simétricas. Su disposición ha creado un espacio distintivo entre ellas, añadido a la simetría. La separación constituye el elemento clave en la composición. Cada torre tiene su propio eje vertical, pero el eje de la composición total se encuentra en el espacio interpuesto. A través de Frank Lloyd Wright, muchos arquitectos se han visto influidos por el aforismo de Lao-Tse de que la realidad de un objeto hueco está en el vacío, no en las paredes que lo delimitan.

El espacio entre las torres se puede percibir como el elemento más real de la composición total. La fuerza visual de la vacuidad se reforzó con la adición de un puente aéreo a media altura, no especificado en las instrucciones iniciales del cliente. El puente y su estructura portante crean, a 170 metros de altura, un portal del cielo, un elemento que puede verse como una puerta hacia el infinito. De ese modo, pues, las torres de Petronas se distinguen de cualquier rascacielos occidental. Esta cualidad singular de las torres no deriva de la propia tradición malaya. Sin embargo, por el simple hecho de manifestarse en Kuala Lumpur, podrán identificarse para siempre con su emplazamiento, de la misma manera que la torre Eiffel es sinónimo de París, aunque su estructura y forma no deriven de la arquitectura parisiense o francesa.

PROYECTO TECNICO

Un puente en el cielo



5. SE NECESITARON TRES DIAS para elevar las 325 toneladas del puente aéreo después de que un rayo dañara el equipo de control.

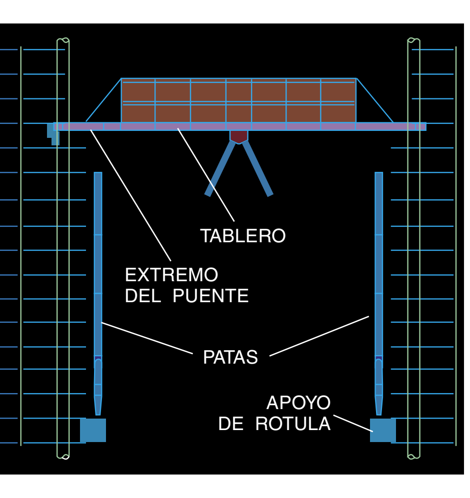
El puente aéreo es un componente funcional esencial de las torres. Uniendo los vestíbulos situados en el mismo nivel altísimo en ambas torres, se permitía un fácil acceso a las salas de reuniones, un *surau* (sala de oraciones), un comedor de ejecutivos y otras oficinas. El puente aéreo es resistente al fuego, por lo que su localización intermedia proporciona una salida de emergencia recíproca entre ambas torres, lo que reduce la exigencia de salidas de incendio adicionales.

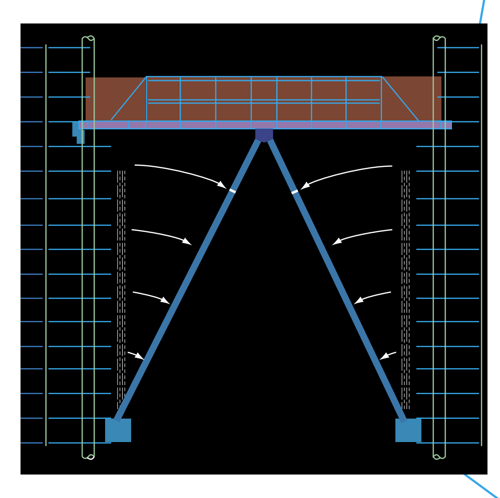
La elección de la configuración en arco permitía usar un delgado tablero en vez de vigas de celosía con elementos entrecruzados. Los puntales del puente, construidos con tubos de acero de 1,1 metros de diámetro, subían en diagonal desde los soportes situados unas plantas más abajo, en cada torre, juntándose en el centro del puente. La conjunción de estos puntales en el centro del vano minimiza el arrufo o levantamiento del tablero del puente, así como el movimiento relativo de las torres. Los ensayos sobre un modelo del puente en el túnel de viento revelaron que se producían vibraciones en estas patas flexibles; podían, pues, causar fatiga por fisuración en algunas uniones soldadas. Se sustituyeron éstas por otras provistas de amortiguadores para reducir el movimiento.

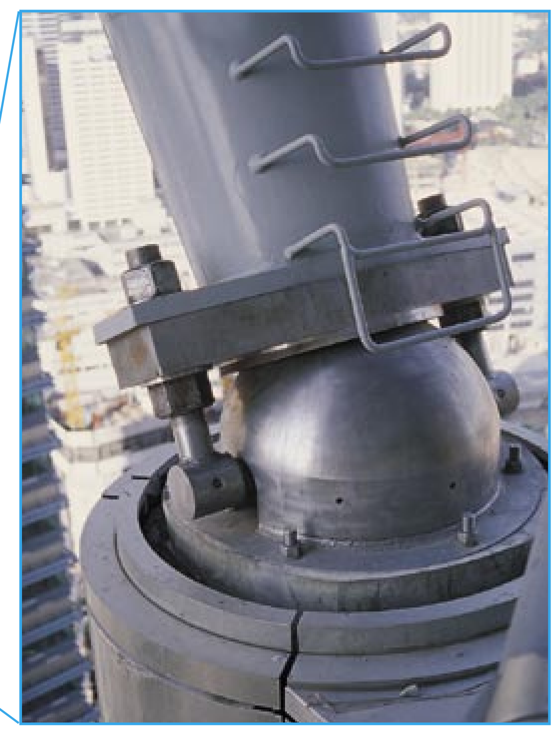
El contratista que levantó el puente ensambló la mayor parte de la estructura a pie de obra. Después se levantaron con los gatos las patas y los extremos del puente. El mayor reto consistió en levantar las 325 toneladas de la porción central que comprendía las tres cuartas partes de la longitud del tablero.

Los pináculos representaron otro obstáculo. Considerando su gran altura y dificultad de acceso, el cliente solicitó una estructura de bajo mantenimiento que pudiera ser inspeccionada fácilmente por dentro y por fuera, ya que la corrosión es un grave problema endémico del trópico húmedo. La cima del edificio consta de tres elementos: un local en forma de tambor sobre la última planta que encierra una unidad de limpieza con ventana de doble hoja. Desde este amplio local, emerge un cono ahusado por el interior. Finalmente, un mástil proporciona la transición visual entre la torre y el cielo. De los 63,2 metros de altura del mástil, 14 de ellos se encuentran embebidos en la estructura del cono, y el resto proyectado por encima. El mástil, de sección variable, tiene diámetros que oscilan entre 2,6 y 0,6 metros. A media altura, una esfera realizada con 14 tubos —cada uno de 300 mm de diámetro, curvados en forma de anillo y unidos entre sí— simbolizan los 14 estados de Malasia. Una esfera de 1,9 metros remata el mástil.

La unidad de limpieza y el propio cono conforman una estructura de acero tradicional a la que se sujetan los paneles de acero inoxidable de la fachada. El mástil, esbelto, está realizado con paneles, planchas y pernos de acero inoxidable; de esa forma se evita la corrosión y se minimiza el mantenimiento. Desde una galería perimetral, situada entre la fachada y la estructura de soporte, se permite la inspección interior por medio de escalerillas laterales, o exterior, mediante los utillajes y equipos de mantenimiento. La utilización de paneles cortos facilitaba la elevación y el montaje, por lo que el mástil se ensambló a partir de pequeñas piezas y en el mismo interior del edificio; se izaría luego con gatos, en dos etapas sucesivas.







6. LAS PATAS DEL PUENTE, sujetadas a cada torre, se alzaron sobre las rótulas de sus apoyos. El puente se elevó después, mediante gatos situados en sus extremos, hasta la planta de los vestíbulos. A continuación, los operarios elevaron el tablero del puente (*izquierda*). Después, se soldaron estas partes conjuntamente, se abatieron hacia el exterior las patas y se unieron con la parte inferior de la estructura (*centro*). El proyecto de las rótulas permite movimientos de las patas del puente en coordinación con el de las torres producido por el viento (*derecha*).

PROYECTO ARQUITECTONICO

Siluetas en el cielo

Conforme ascienden, las torres se van estrechando en seis gradaciones. Además, en las secciones superiores los muros se inclinan levemente hacia el centro, completándose la forma envolvente y reforzando visualmente el *axis mundi*, o línea vertical central del rascacielos. Los pináculos de las torres se alargan hacia el cielo destacando su silueta.

A lo largo de todo el proceso de proyecto, los edificios mantuvieron su aspecto básico y la imagen presentada en el concurso, pero también se produjeron cambios. La estrella de doce puntas evolucionó hasta una forma de 16 lóbulos; las torres se remataron con pináculos y se aumentó su altura hasta alcanzar 451,9 metros, convirtiéndolas en los edificios más altos del mundo.

Las imágenes que las torres proyectarían contra el cielo requerían un detallado estudio. Nosotros habíamos propuesto en el concurso un proyecto apuntado, pero sin pináculo. Los clientes prefirieron un remate inequívocamente malayo y no otro que pudiera sugerir su inspiración en los rascacielos existentes o en los campanarios de las iglesias. Se hicieron varios bocetos, hasta que se llegó al pináculo escogido.

Desde la cimentación hasta el puente aéreo y los pináculos, la construcción se encuentra ya terminada. Se han empezado ya a habitar algunas estancias. Al menos por algún tiempo, las torres de Petronas ocuparán el puesto que corresponde al mayor rascacielos del mundo. Pero aún más significativo que esta circunstancia es el hecho de que estas torres se constituyen en símbolo de esta nación.

CESAR PELLI, CHARLES THORNTON y LEONARD JOSEPH colaboraron en el proyecto de las torres gemelas de Petronas. Pelli dirige el estudio de arquitectura Cesar Pelli & Associates en New Haven. Fue decano de la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Yale desde 1977 hasta 1984. En 1995 Pelli recibió la medalla de oro del Instituto Americano de Arquitectos. Thornton es presidente y director de Thornton-Tomasetti Engineers/LZA en Nueva York. Ha encabezado los proyectos de ingeniería de One Liberty Place, en Filadelfia, el complejo deportivo United Center en Chicago y la terminal de United Airlines en el aeropuerto O'Hare de Chicago, entre otros. Ha enseñado en el Colegio de Manhattan, el Instituto Pratt, la Universidad de Princeton y en la Cooper Union. Fue coautor con Joseph del libro *Exposed Structure in Building Design*. Joseph es vicepresidente del Thornton-Tomasetti Engineers. Ha colaborado en el proyecto de diversos tipos de estructuras, entre las que se encuentran edificios, puentes, puertos, aparcamientos, hangares y fábricas. Sus proyectos de edificios en altura incluyen los 50 pisos de la torre Chifley en Sidney, Australia, y las 54 plantas del centro One Mellon Bank en Pittsburgh.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE PETRONAS TOWERS - THE TALLEST BUILDING IN THE WORLD. Hamdan Mohamad, Tiam Choon, Tarique Azam y Stephen Tong en *Habitat and the High-Rise: Tradition and Innovation.* Procedente del Quinto Congreso Mundial. Dirigido por Lynn S. Beedle. Council on Tall Buildings and Urban Habitat and the Dutch Council on Tall Buildings, 1995.

COSMIC PILLARS: PHILOSOPHY OF TALL BUILDINGS. Cesar Pelli en *Collected Papers of Habitat and the High-Rise*, Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 1996.

A qué llamar altura

El Consejo sobre Altura de los Edificios y Urbanismo, cuya sede se halla en los Estados Unidos, ha complicado la definición de lo que debe entenderse por el edificio más alto del mundo. El comité decidió el 12 de abril de 1996 que las torres de Petronas merecían esta designación; el criterio era la distancia desde el suelo hasta la cúspide de la estructura. Después, el 10 de julio de 1997, modificó el criterio. En la nueva decisión del consejo, las torres de la compañía Petronas pasaban a ser sólo uno de los tres edificios más altos, pero manteniendo su posición de ser el más alto del mundo (hasta su "cima estructural"). Al mismo tiempo, introdujo el consejo tres nuevas categorías: la altura hasta la punta de la aguja o antena (ostentada por el World Trade Center de Nueva York), la altura hasta la última azotea y la altura hasta el piso ocupado más alto (estos dos últimos récords son de la torre de Sears en Chicago).



Puerta de China

La más ambiciosa obra civil acometida en el mundo comprende entre otras cosas un nuevo aeropuerto, dos puentes de primer rango mundial y dos cruces sumergidos de la bahía de Victoria

John J. Kosowatz
Fotografías de Andy Ryan

El retorno de Hong Kong a China el pasado julio suscitó una general expectación. Por todo el mundo se aventuraban pronósticos sobre el porvenir de este diminuto bastión del capitalismo puro y duro, asediado por el último imperio comunista. Mas, pese a la diversidad de los vaticinios, la mayoría coincidía en una clara afirmación: Hong Kong mantendría su condición de puerta de China.

Una razón para que Hong Kong continúe sirviendo de punto de acceso al continente es el Programa Central del Aeropuerto, ambicioso plan de infraestructuras que costará más de tres billones de pesetas y habrá de terminarse este año. Sólo en el emporio mercantil de Hong Kong podría un proyecto de tal magnitud concebirse, aprobarse, financiarse, salir a concurso y casi completarse en siete años. La magnitud de la obra es enorme. La verdad es que el programa central del aeropuerto se propone realizar la mayor infraestructura urbana jamás emprendida.

Su núcleo es la construcción del que será el mayor aeropuerto del mundo en Chek Lap Kok, al borde de la isla de Lantau, 25 kilómetros al oeste del centro comercial de Hong Kong. El enlace con el centro de Hong Kong exige tender 34 kilómetros de nuevas autopistas y líneas de ferrocarril, dos impresionantes puentes y dos pasos sumergidos de la bahía de Victoria. Además, los contratistas están levantando cerca de Lantau una ciudad nueva, Tung Chung, para alojar al menos a 200.000 personas, que en su mayoría trabajarán en el aeropuerto de Chek Lap Kok.

HONG KONG, bajo dominio chino, seguirá siendo la principal entrada al continente, en parte gracias a su nuevo aeropuerto de Chek Lap Kok.



Los urbanistas propusieron esta construcción a finales de los ochenta, porque Hong Kong se transformaba a toda prisa en uno de los destinos más concurridos del mundo. El aeropuerto actual, Kai Tak, no admitía ampliación por estar situado en el centro de Kowloon, congestionadísimo distrito donde los aviones se ven obligados a seguir atrevidas rutas de aproximación entre altos edificios. Por ello, en 1989, el gobierno aprobó los planes de un nuevo aeropuerto. Un año después se constituyó la Oficina de Coordinación de Proyectos del Nuevo Aeropuerto (siglas en inglés, NAPCO), que actúa como gerente del proyecto y la construcción en representación de los propietarios: el gobierno local, la autoridad portuaria de Hong Kong, la compañía de ferrocarriles expresos y la compañía del túnel de la bahía occidental.

Los técnicos de NAPCO, dirigidos hoy por Tudor P. Walters, vicepresidente de Bechtel, importante firma norteamericana de ingeniería y contratista de obras, abordaron con rapidez el proyecto. Para mantener los plazos de ejecución y reducir los costes al mínimo decidieron que la mayoría de los contratos fuesen por suma global, a precio fijo, y que se evitasen sistemas y técnicas no experimentados. Utilizar métodos que no estuvieran probados en otro lugar hubiera planteado más problemas, por cuanto los contratis-



Chek Lap Kok

CONFIGURACION DEL AEROPUERTO

PLATAFORMA

Para que pudiera iniciarse cualquier construcción del nuevo aeropuerto, los contratistas tenían que empezar por crear una plataforma de sustentación de 1248 hectáreas (*derecha*). Chek Lap Kok era demasiado pequeño y montuoso para el enorme edificio y las largas pistas que se necesitaban. Un consorcio formado por Gammon Construction de Hong Kong, Nishimatsu Construction de Japón y otras firmas ganó el primer concurso de esta obra, por valor de 180.000 millones de pesetas; terminó su tarea en 1995, en 41 meses solamente. Con objeto de proporcionar una base para la plataforma Gammon/Nishimatsu nivelaron tanto Chep Lap Kok que abarca 302 hectáreas como una islita menor adyacente, a una altura de seis metros sobre el nivel del mar. El resto de la superficie lo rellenaron con tierra recuperada. En total, la operación redistribuyó unos 347 millones de metros cúbicos de rocas y suelo y monopolizó gran parte de la flota de dragadores mundial.



tas afrontaban grandes dificultades logísticas: las zonas elegidas para el aeropuerto en Chek Lap Kok y los puentes estaban muy alejadas y carecían de vías de suministro, y los emplazamientos de las obras en el cercano Kowloon y Hong Kong soportaban un intenso tráfico en un espacio limitado.

Aparte de la ingeniería, NAPCO tenía que aportar la financiación necesaria. La confrontación política sostenida entre China y el Reino Unido ensombreció el programa desde sus comienzos. China, a punto de recuperar Hong Kong, tardó largo tiempo en convencerse de que el proyecto valía la pena. Pero al fin, en 1995, las negociaciones cristalizaron en un asombroso acuerdo: Hong Kong financiaría el 75 % de los costes mediante una inversión en acciones del proyecto, que se extraería de las reservas fiscales de 2,9 billones y 8,65 billones de pesetas establecidas inicialmente para intercambios comerciales con el extranjero. El 25 % restante se cubriría con empréstitos. NAPCO comenzó a contratar inmediatamente.

Hasta la fecha, China parece impresionada por los resultados. A principios de 1997 se aprobó la construcción de una segunda pista de 3800 metros y una ampliación del terminal hacia el noroeste.





PROYECTO

Del vasto terminal de Chek Lap Kok se ocupó Foster Asia, sociedad establecida en Hong Kong por el arquitecto británico Norman Foster. El proyecto inicial, redactado por el gobierno, señalaba una serie de edificios de hormigón, unidos entre sí. Pero Foster Asia quería más luz natural y espacios abiertos. Se decidió entonces que un edificio único no sólo tendría mejor aspecto, sino que sería más fácil de construir en el corto tiempo permitido. Además, Foster Asia consideró que un solo edificio podría sobrevivir con más fortuna a los tifones estacionales que azotan Hong Kong.

El proyecto final requiere, para su ejecución, unos 350.000 metros cúbicos de hormigón, junto con 21.000 toneladas de acero para los techos y 2400 toneladas de acero tubular para sustentar los muros y las mamparas de vidrio. El edificio ocupa 516.000 metros cuadrados, con una forma que recuerda la de un avión de cuerpo ancho (*izquierda*). Las zonas de afluencia y las puertas principales cubren 490.000 metros cuadrados y se extienden a lo largo de 1,3 kilómetros; las zonas de las puertas más lejanas se abren en cola de golondrina. Las 39 puertas fijas admiten todas el mayor avión de pasajeros del mundo, el Boeing 747.

El terminal comprende ocho niveles. El primero, destinado al transporte automático de pasajeros, incluye un túnel de casi un kilómetro, construido por Gammon/Nishimatsu. En el segundo nivel hay una sala de equipajes de 320 por 160 metros, cerrada al público. Los seis niveles restantes albergan un gran complejo de actividades, las llegadas y salidas, las salas de espera y los mostradores de facturación y despacho de billetes. Estas plantas comprenden pocas paredes interiores, lo que permite a los visitantes ver con claridad de uno a otro extremo del terminal. Las paredes de cristal cierran un perímetro de 4,4 kilómetros en torno del terminal y permiten contemplar las pistas.

TECHOS

Martin Manning, presidente de Ove Arup and Partners, dirigió el proyecto de los techos que cubren el edificio entero. Una ligera celosía de acero, revestida por una membrana de tela, da al techo su perfil ondulado característico. Las vigas universales entrelazadas de la celosía forman bóvedas tubulares, semicirculares, semejantes a los arcos de medio punto de algunas iglesias medievales. Se encajan lumbreras cenitales en cada uno de los 129 módulos de techo, de 36 por 36 metros y 120 toneladas de peso. Dichos módulos se sustentan en columnas interiores y se conectan también a los maineles de las paredes exteriores, es decir, a las barras verticales que separan las distintas ventanas dentro de una serie. Para esta última unión, se diseñaron unas juntas de acero que permiten desplazamientos horizontales y verticales de techo y paredes entre sí; con ello la estructura adquiere flexibilidad para aguantar vientos muy fuertes.



CONSTRUCCION

El contrato de 193.000 millones de pesetas destinado a realizar el plan de Foster fue concedido a un consorcio de cinco firmas británicas, chinas y japonesas (BCJ): China State Construction Engineering Corporation, Kumagai Gumi (HK), Maeda Corporation, Amec International Construction y Balfour Beatty. BCJ terminó su trabajo en otoño del año pasado, recuperando así el retraso. Gammon/Nishimatsu había demorado la entrega de la plataforma a BCJ a causa de las torrenciales lluvias de 1994 y el mal estado del terreno en Chek Lap Kok. En el momento de mayor intensidad de construcción en el terminal, BCJ empleaba más de 1600 operarios.





Enlace de Lantau



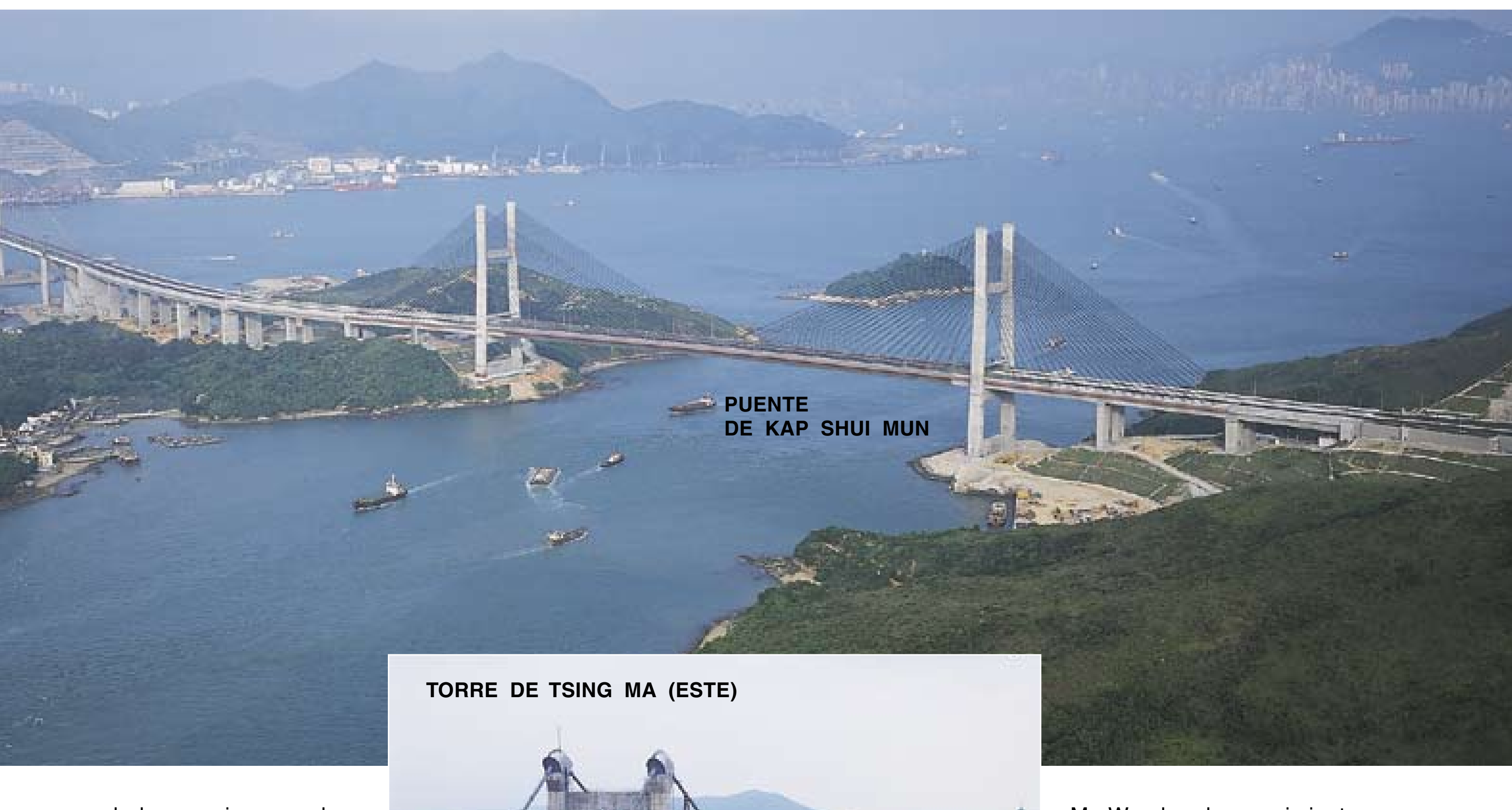
PUENTE DE TSING MA

PROYECTO

El enlace de Lantau, convertido ya en símbolo nacional para China, une la isla de Lantau con el continente por encima de un concurrido canal de navegación que conduce al delta del río Pearl. Su elemento central es el puente colgante de Tsing Ma, de doble piso. Con sus 2,17 kilómetros, Tsing Ma es el puente colgante más largo jamás construido para carretera y ferrocarril a la vez. En virtud de un contrato de 137.000 millones de pesetas, la sociedad anglo-japonesa de construcción formada por Trafalgar House Construction (Asia), Costain Civil Engineering y Mitsui and Company comenzó a construir el puente de Tsing Ma en 1992 y lo acabó en 1996.

TABLEROS

Cuatro años es un plazo asombroso para tamaña empresa. Los tifones que azotan el sur de China y la situación de Tsing Ma en un estrecho exigían un proyecto que fuese capaz de soportar vientos ascendentes de 300 kilómetros por hora. Cincuenta y una secciones de puente de dos pisos y perfil aerodinámico se amasaron en una robusta combinación de estructuras en caja y armazones triangulares, o en celosía. En cada



TORRE DE TSING MA (ESTE)

una de las secciones se han perforado conductos de aireación para encauzar los fuertes vientos y conseguir una estabilidad mayor.

Las compañías japonesas y británicas fabricaron estas secciones de tableros de acero y las enviaron a China, a un punto aguas arriba de la obra. Las secciones de 1000 toneladas, ya montadas, fueron transportadas río abajo en barcazas, y luego una grúa de pórtico las fue levantando desde aguas poco profundas. Las secciones tienen 40 metros de anchura, 36 metros de longitud y 7,3 metros de altura, con lo que admiten seis carriles para tráfico de vehículos en el piso de arriba y una línea de ferrocarril más dos carriles de tráfico de emergencia, en el de abajo.

TORRES

El vano principal de Tsing Ma está soportado por dos torres de hormigón armado, de 206 metros de altura cada una. Mitsui/Costain construyó las torres valiéndose de armazones deslizantes que se trasladaban con facilidad conforme avanzaba la obra de hormigón. Los contratistas terminaron el trabajo a un ritmo muy intenso, en tres meses nada más. La torre oriental tiene firme asiento en el lecho rocoso de la isla de Tsing Yi. Por el extremo occidental, la torre de Ma Wan hunde sus cimientos en el suelo rocoso del canal. En torno de los cimientos se construyó una isla artificial para protegerla contra los accidentes de la navegación.

CABLES

Unos gruesos cables, de 1,1 metros de diámetro, unen las torres por su parte superior. El trenzado de estos cables, que suman 27.500 toneladas de alambre de acero galvanizado, fue realizado por gurkas del Ejército británico, apoyados en frágiles tablones a alturas de vértigo. El contratista eligió este modo de trabajar, llamado cableado aéreo, por razones de experiencia y de coste.

Pese a los peligros que esta operación comporta, la firma opinó que sería demasiado embarazoso formar unos cables de ese tamaño en la fábrica y después instalarlos en su lugar. Los cables terminados pasan sobre unos estribos montados en la cima de las torres y se mantienen tensos por unos anclajes que tiran de ellos a uno y otro extremo. De los cables principales cuelgan unos cables suspendidos, separados a 10 metros, que sostienen el vano principal de 1377 metros de longitud, así como el vano occidental de 359 metros. El vano oriental, algo más corto, se apoya en pilares de hormigón.

PUENTE DE KAP SHUI MUN


TORRES DE KAP SHUI MUN

PUENTE DE KAP SHUI MUN

TORRES

El vecino puente de Kap Shui Mun, arriostrado por cables, es el siguiente tramo del enlace de Lantau y presenta un vano central de 430 metros de luz. En total, salva una distancia de 750 metros y posee uno de los tableros más pesados del mundo en relación con su longitud. Del puente, contratado en 32.000 millones de pesetas, se ocupó Kumagai Gumi (HK), Maeda Corporation, Yokogawa Bridge Corporation e Hitachi Zosen Corporation de Japón, formando otra sociedad internacional. El Kap Shui Mun se apoya principalmente en dos torres en forma de H, de 145 metros de altura cada una.

TABLEROS

Los tableros del puente adoptan dos sistemas estructurales diferentes. La parte central del vano principal consiste en una estructura en doble caja, formada por un compuesto de acero y hormigón. El contratista moldeó, en la isla de Lantau, los tableros de hormigón superior e inferior sobre nervaduras de acero prefabricadas, los puso a flote y después los levantó hasta su posición correcta. En cambio, los vanos laterales y el resto del vano central se componen de jácenas de acero —cuatro planchas soldadas en sección de caja— reforzadas con hormigón y desplazadas además a su lugar a uno y otro lado de las torres. Como el tablero tenía 35,2 metros de ancho, hubo que colocar enseguida dos jácenas en los costados

para ajustarse al vano. Se utilizó hormigón para unir cada par en el nivel inferior y puntales para acoplar las planchas superiores.

Los ganchos de arrastre —extremidad frontal de las jácenas utilizada para mover las secciones hasta su posición correcta— se mantuvieron y se incorporaron al proyecto. Sirven como elementos de transición entre la sección principal de acero compuesto y las secciones laterales de hormigón. El punto en el que estos dos sistemas estructurales se encuentran, a uno y otro lado, indica la profundidad del agua en el canal de Kap Shui Mun, que ha de ser suficiente para mantener a flote las pesadas secciones de acero compuesto. Ese punto distaba 45 metros de cada torre.

VIADUCTO DE MA WAN

A continuación viene el viaducto de Ma Wan, de 504 metros de longitud. Para construirlo se fueron moldeando sobre el propio emplazamiento los segmentos de hormigón, valiéndose de torres provisionales que los soportaban hasta que tuvieron resistencia suficiente para sostenerse solos. Se moldearon así seis tramos de 84 metros de longitud. Constaba cada uno de cuatro segmentos de 21 metros. Estas vigas de hormigón se tensaron luego por medio de alambres que, al estirarse a través del hormigón, le dan una mayor resistencia a la tracción con el fin de reducir el riesgo de agrietamiento.

VIADUCTO DE KWAI CHUNG

VIADUCTO DE KWAI CHUNG

El viaducto de Kwai Chung, en la vía rápida de Kowloon Oeste, planteó bastantes dificultades. Dado que por los tres kilómetros de este viaducto tenían que circular coches y el ferrocarril del aeropuerto, hubo que recurrir a varios proyectos distintos. "No hay ninguna columna ni viga de tipo corriente", advierte Ian J. Jones, ingeniero residente de Scott Wilson Kirkpatrick, firma consultora del departamento de autopistas.

La estructura de la calzada principal se formó encima de vigas en U de hormigón prevaciado, que habían sido pretensadas. Para aumentar su resistencia, el hormigón se comprimió con pesados cables o barras antes de depositarlo. Después se moldearon sobre el mismo emplazamiento los tableros de hormigón propiamente dichos. La brigada constructora formó las secciones de vía férrea a partir de segmentos de hormigón prevaciado que se tensaron luego. Estas secciones ferroviarias se extienden sobre una serie de columnas, que descansan sobre largos y pesados pilotes enterrados en el suelo o sobre cimentaciones sustentadas por otro tipo de apoyos. Gran parte de la obra de este proyecto se ha edificado sobre terraplenes, como es habitual en Hong Kong. Los contratistas franceses tuvieron que excavar hasta 30 o 40 metros de profundidad para encontrar terreno estable donde pudieran anclarse los pilotes. Otra complicación más fue el tener que construir en muchos lugares el viaducto por encima de 15 carriles viarios que no podían cortarse al tráfico.

Cruce de la bahía occidental

La japonesa Nishimatsu Construction en consorcio con Kumagai Gumi (HK) ganó el concurso de 109.500 millones de pesetas para construir el tramo final del proyecto, el cruce sumergido de la bahía de Victoria que muere en el centro de Hong Kong. Los accesos a este túnel de dos kilómetros a uno y otro lado de la bahía están construidos sobre terreno recuperado. El lado que mira a Hong Kong resultó ser más difícil por encontrar grandes volúmenes de lodos marinos. Hubo que empotrar, hasta profundidades de 40 metros, muros que actuasen como diafragmas para separar el lodo y proporcionar estabilidad a los cimientos. Costó menos terraplenar la vertiente de Kowloon. Por tal motivo el contratista pudo realizar el acceso utilizando secciones en caja de hormigón armado que se moldeaban en el propio emplazamiento.

Las gigantescas secciones de tubo que formarían el túnel se montaron en una cantera situada a la orilla del mar en el otro lado de la isla de Hong Kong. Una vez ensambladas estas secciones, la

cantera se inundó; los tubos flotantes se remolcaron hasta su destino. En el mismo lugar se construyeron las secciones de túnel ferroviario. Todas estas secciones habían de sumergirse sujetas a una máquina dragadora que excavaría una zanja en el fondo de la bahía, para lo cual todas iban provistas de depósitos de lastre y asideros adecuados. Alojadas ya en la zanja, las secciones quedaron fijadas en su correcta posición y herméticamente cerradas por cremalleras horizontales.

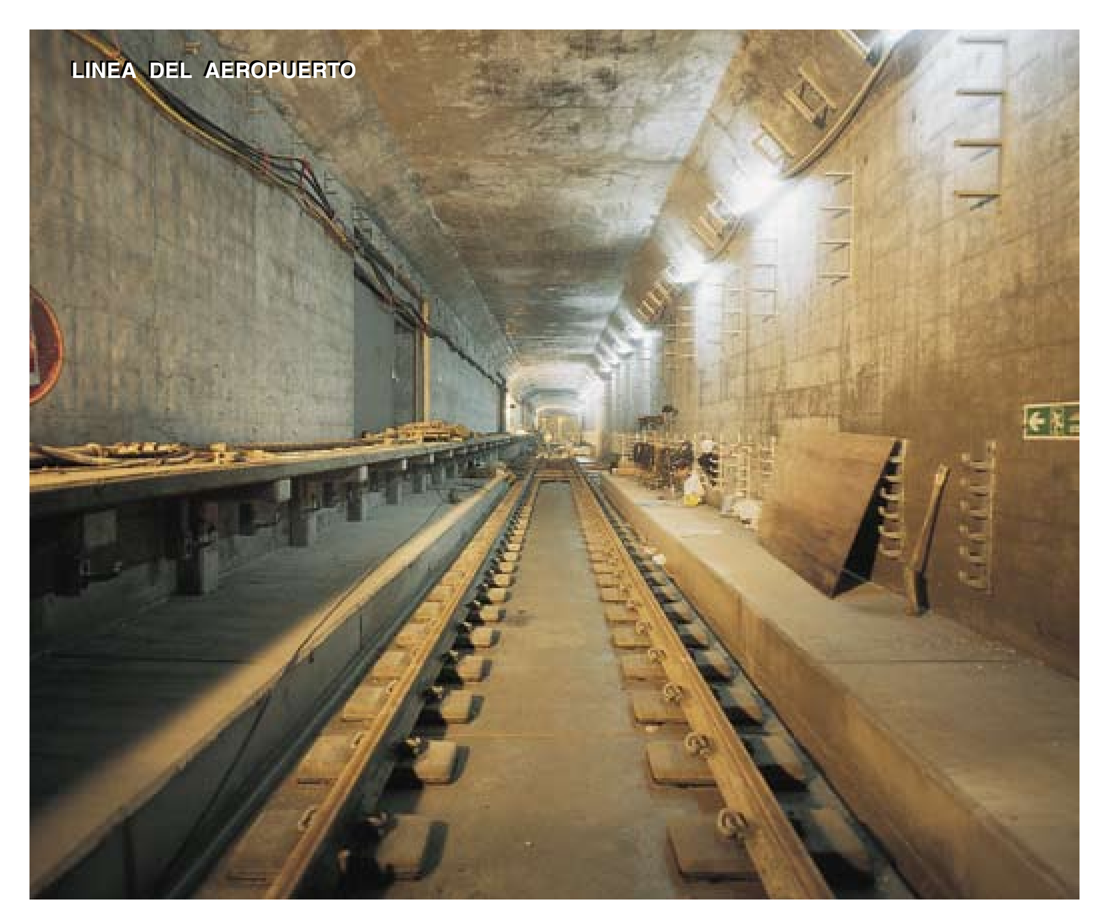


Terminal de la línea del aeropuerto

El terminal de la línea que enlaza con el aeropuerto, valorado en 79.000 millones de pesetas, ocupa un terreno de seis hectáreas en frente de la Exchange Place, donde se encuentra la Bolsa de valores de Hong Kong. Aloja una estación subterránea de cinco pisos, numerosos túneles de ferrocarril y un edificio con techo de acero que cubre 25 metros. Su característica más peculiar es el túnel peatonal que une el terminal con la actual estación central de ferrocarriles expresos.

Este túnel de 300 metros de longitud, cuyo coste alcanzó los 14.000 millones de pesetas, se desliza directamente por debajo de la bolsa de Hong Kong. Los trabajadores de Aoki Corporation (Japón) han construido la galería pasando entre los pilares de los cimientos de la bolsa, con grandes precauciones para no cortar el enlace de fibra óptica ni otras líneas de servicio. Además tenían que cuidarse de no hacer ningún ajuste capaz de provocar asentamientos del edificio, tanto ahora como en





el futuro. El pasadizo también cruza por debajo de la avenida Connaught, una de las arterias más concurridas de Hong Kong. Pese a estas dificultades, se prevé que la línea de ferrocarril entre en servicio en junio de este año, dos meses después de iniciar sus operaciones el aeropuerto de Chek Lap Kok.

Puede obtenerse más información sobre el aeropuerto de Chek Lap Kok en la dirección http:///www.hkairport.com de la Web.

JOHN J. KOSOWATZ trabaja en Engineering News-Record.

Blaise Simon

Una centrifugación apacible

Puesta en pleno contacto con el aire, una capa delgada de una solución de agua azucarada parece inmóvil, inmutable. Pero no hay que fiarse del agua mansa. Al cabo de unos días, el agua se habrá casi evaporado, dejando un líquido viscoso, concentrado en azúcar. ¿Fue regular esa evaporación? Un examen atento revela fenómenos insospechables, con los cuales vamos a montar una centrifugadora "económica".

La física de la evaporación es harto sencilla. Cuando una solución se evapora, el desprendimiento del agua en la superficie libre empieza por enfriar la solución por el mismo fenómeno que, al salir de un baño de mar, somos sensibles a la menor brisa. En efecto, el agua sólo se evapora espontáneamente en la atmósfera si dispone de calor, y éste procede del cuerpo humano, que se enfría (el fenómeno es aún más claro cuando es éter lo que se evapora).

La salida del agua superficial está acompañada de un aumento de la concentración de las moléculas del soluto. La densidad de la capa superior aumenta así por una doble razón: la solución es más densa cuanto más fría esté y la solución es más densa cuanto más concentrada sea. Este adensamiento pone a la solución en movimiento. El volumen de solución que desciende de la superficie superior es sustituido por líquido procedente de la parte inferior, menos denso.

Este fenómeno de convección, que se manifiesta generalmente cuando se calienta un líquido por abajo, se emplea en los sistemas de calefacción domésticos: en el sótano, la caldera calienta el agua que, ya menos densa, sube hacia los pisos superiores, se enfría cediendo calor en los radiadores y vuelve a bajar en la última parte de su recorrido cerrado.

Examinando este fenómeno, a comienzos del siglo XX, Henri Bénard, señaló que, si se calienta por debajo una capa de aceite de esperma de ballena, aquélla se pone en movimiento formando una red hexagonal de células en forma de panal de abejas. Es fácil observar movimientos de este tipo en una capa delgada de aceite que se caliente en una estufa. Ahora bien, calentar por abajo o enfriar por arriba, ¿no viene a ser lo mismo?

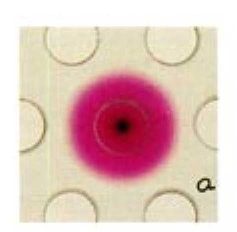
No en el caso de las soluciones de azúcar, en las que se observa un conjunto de células de convección muy irregular, "caótico". Las células convectivas son polígonos, cuyo número de lados está comprendido entre tres y ocho, que rellenan el espacio según una estadística que se ha observado en sistemas completamente distintos; los prismas basálticos de la Calzada de los Gigantes, en Irlanda, las células epiteliales de los pepinos, la organización de las células fotoreceptoras, o bastoncitos, del fondo de la retina, etc.

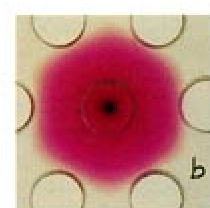
Para compensar, si en vez de dejar que el líquido se evapore libremente, guiamos su evaporación, podemos organizar a voluntad el movimiento convectivo.

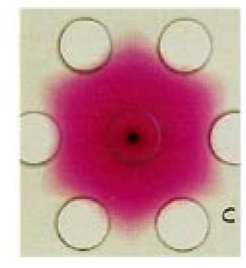
Encima del líquido (*véase la figura 2*) coloquemos láminas de vidrio paralelas, dejando entre ellas espacios por los que el líquido se evapore; en esos lugares, el líquido adensado por la evaporación se desplaza hacia el fondo. Este movimiento va acompañado de una subida de líquido hacia las láminas; así se instala en la capa líquida un sistema de rulos convectivos, de la periodicidad impuesta por las láminas. Las velocidades de desplazamiento son reducidas (en torno a las 20 micras por segundo).

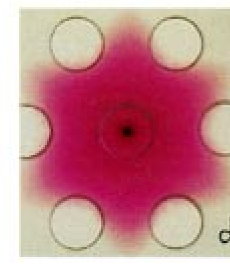
Sustituyamos ahora las láminas de vidrio por una placa de plexiglás con orificios taladrados formando una red hexagonal o cuadrada. Entonces, cuando el agua se evapore, el fluido se pondrá en movimiento creando células de convección hexagonales o cuadradas. En otras palabras, podemos gobernar la geometría de la convección. Dejo a los lectores la experimentación con las geometrías de los orificios, que les proporcionarán geometrías de células diversas.

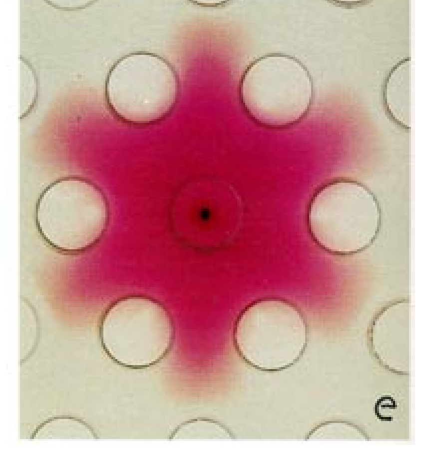
Acerca de tales fluidos en movimiento lento y regular, nos interesan dos cuestiones. ¿Cómo se comportan las suspensiones de granos? ¿Cómo es transportado un colorante inerte?





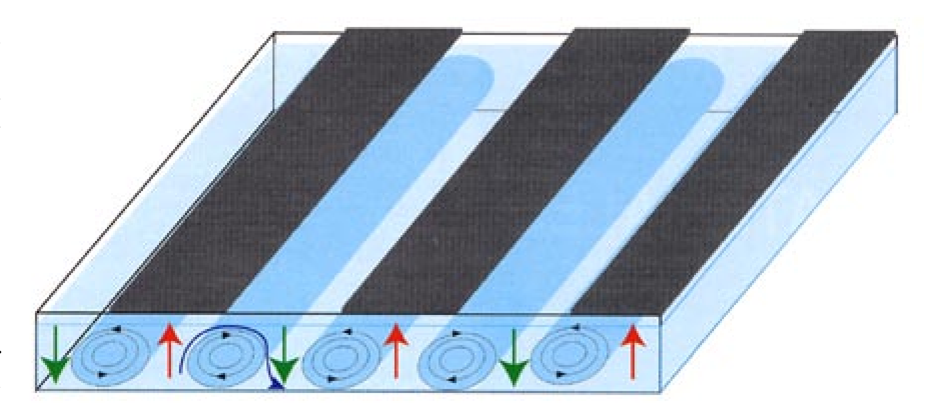


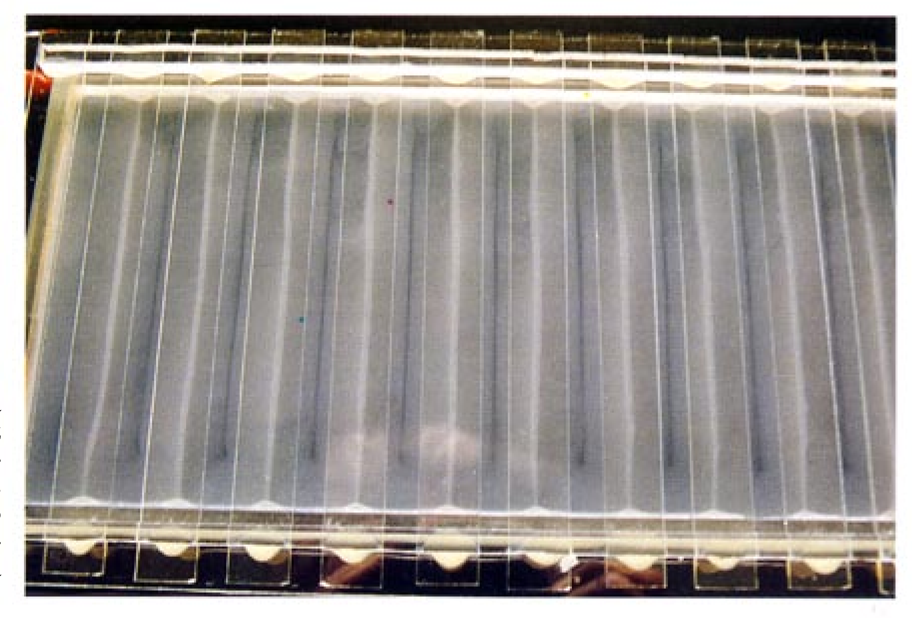




1. Cuando se coloca una lámina de plexiglás con taladros dispuestos hexagonalmente encima de una cubeta, llena de una solución azucarada, resulta una evaporación guiada y se crean células de convección repartidas según la misma organización hexagonal. En este ensayo, para evidenciar la convección se añadió un cristal de permanganato potásico que se disolvió en el centro de una célula de convección. El líquido así coloreado por el permanganato potásico di-

2. La evaporación de un líquido es más intensa cuando se halla en pleno contacto con el aire. Aquí, en las zonas no cubiertas por una de las placas de vidrio, el líquido enfriado por la evaporación se adensa, se hunde hacia el fondo del recipiente y pone en movimiento al resto de la solución, generando un sistema de rulos de convección paralelos. Progresivamente, en el fondo del recipiente y en las zonas no cubiertas por una placa (flecha azul) *se depositan las partículas sólidas en suspensión. En el ensayo de la ilustración inferior, se observa la sedimentación de pequeñas partículas de azufre tras haber tenido lugar una convección con rulos. Los granos son tan pequeños, que su velocidad de caída dentro de la suspensión inmóvil resulta despreciable. Sin embargo, la convección provoca su acumulación bajo el centro de las bandas de vidrio, de acuerdo con nuestra teoría*

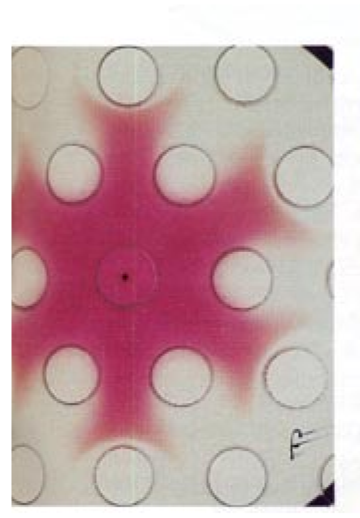


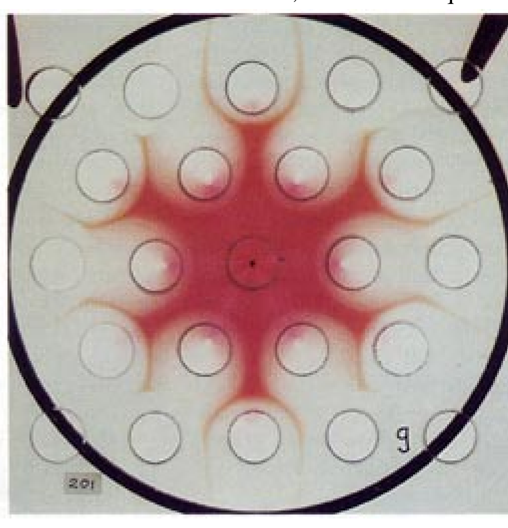


Diluyamos algunas gotas de tinta china en agua azucarada (unos diez gramos de azúcar por diez centilitros de agua). Coloquemos a tres milímetros por encima del líquido una placa con orificios de dos centímetros de diámetro y una distancia de seis centímetros entre centros. Si los granos de la tinta tuvieran la misma densidad que el líquido, permanecerían en suspensión y el líquido seguiría siendo homogéneo. Sin embargo, como su densidad es mayor, aunque sean arrastrados por el líquido, acaban por caer al fondo del recipiente. La trayectoria de cada grano es una especie de espiral.

La figura 2 muestra que, cuando los granos se acercan al fondo, son acarreados hacia los puntos de estancamiento, donde el líquido empieza a subir, bajo las placas. O sea, se acumulan a lo largo de las líneas que dibujan los polígonos de convección.

Los autores han acometido experimentos más precisos con suspen-

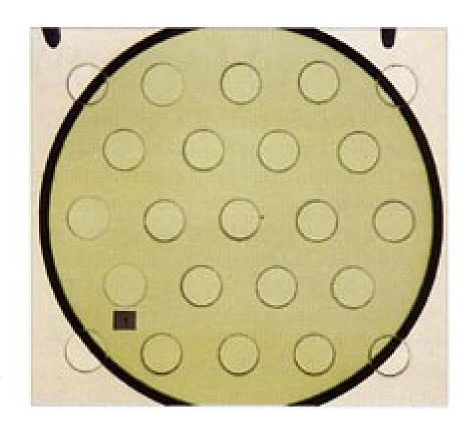




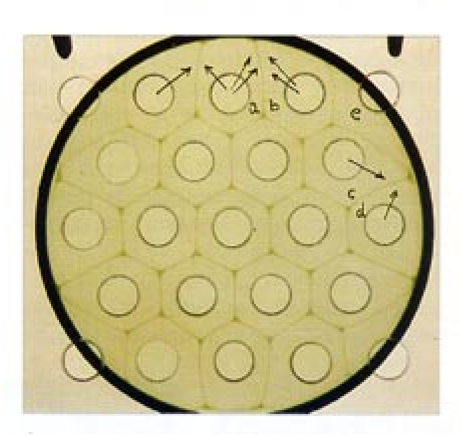


suelto, más denso que la solución, se esparce por el fondo del recipiente y se abre camino a lo largo de las zonas de menor resistencia aerodinámica. Las siete primeras fotos desde la izquierda fueron tomadas, respectivamente, a los 5, 10, 15, 20, 30, 50 minutos y una hora y media después de introducir el cristal de permanganato potásico. La fotografía de la derecha muestra el aspecto final de la solución, tras haberse retirado la lámina

3. Evolución de una capa líquida coloreada por pintura a la aguada verde, en un régimen de células hexagonales. El diámetro del recipiente es de 15 centímetros. La segunda fotografía se tomó una hora después del comienzo de la convección; la tercera, dos horas después de la primera







siones de granos de azufre, mejor definidos. Para ello preparamos suspensiones de granos de medida muy pequeña (dos micras de diámetro), de aspecto lechoso y que son estables. Estos granos casi no se sedimentan.

Creemos rulos de convección colocando esta solución en un recipiente rectangular cubierto por láminas de vidrio paralelas. Transcurridas pocas horas se observa la acumulación preferencial de granos en forma de taludes rectilíneos; así se separan los granos del líquido, gracias al movimiento producido por la evaporación espontánea. Es decir, hemos construido una centrifugadora económica, que funciona sin motor.

En un nuevo ensayo, examinemos cómo se propaga un líquido coloreado transportado por el seno de una capa líquida donde la convección es regular.

Pongamos en la cubeta una capa de solución acuosa de azúcar y organicemos una convección hexagonal. Cuando se alcanza un régimen estable, o sea, tras una hora más o menos, introduzcamos en el centro de una célula convectiva una cristal de permanganato potásico. Se disuelve enseguida, dando un líquido violeta, más denso que la solución de azúcar y que se queda reptando en el fondo de la cubeta. Este líquido se ve primero que se despliega circularmente, como si todo el líquido estuviera inmóvil, pero la mancha en un comienzo redonda se va haciendo progresivamente hexagonal, lo que revela que el líquido ocupa la célula de convección. El paso hacia una célula vecina es difícil, pues el movimiento del fluido se opone a la propagación del colorante; la extensión de este último se ralentiza, y su propagación tiene lugar principalmente en las zonas de menor resistencia hidrodinámica.

Las fotografías de la figura 1 muestran los sucesivos aspectos de la zona coloreada con el paso del tiempo. El color del líquido cambia progresivamente, puesto que se forma dióxido de manganeso cuando el azúcar reduce al ion permanganato. Los granos parduscos de dióxido de manganeso precipitan y, lentamente, son transportados hacia la periferia, en forma de líneas. La figura finalmente observada, al cabo de unas dos horas, es simétrica. Ciertos brazos son más cortos que otros, porque su alargamiento lo estorba una contracorriente debida a la evaporación bajo los orificios pequeños que hay en la periferia del recipiente.

Así, controlando la evaporación de un líquido, es posible ponerlo en movimiento regular a velocidad muy lenta, sin una bomba y, por tanto, con poco gasto de energía. En un tal movimiento, imperceptible a simple vista, pueden observarse efectos espectaculares y acaso útiles.

Ian Stewart

Un cálculo para la cuna del gato

Los nudos, los eslabones y su parentela llevan milenios fascinando a las personas de gustos matemáticos. Sin embargo, hasta los años veinte de nuestro siglo no empezaron los matemáticos a tajar el escurridizo problema de la caracterización de los nudos, a distinguir los nudos de distintos tipos y, en general, a comprender cuál es la razón de que los nudos estén anudados, y los eslabones, concatenados. Sus investigaciones desembocaron en la creación de la topología, poderosa herramienta de las matemáticas actuales.

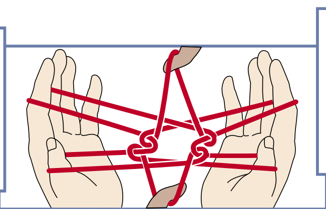
A lo largo de los últimos diez años hemos conocido avances impresionantes en la teoría de nudos y, muy en especial, de la invención, por Vaughan Jones, del que es hoy denominado polinomio de Jones, una expresión algebraica asociada con el nudo [*véase* "Teoría de nudos y mecánica estadística", por Vaughan F. R. Jones; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1991]. Dos nudos que tengan un polinomio de Jones diferente son topológicamente distintos, lo que significa que no podemos deformar ninguno de ellos de manera continua hasta convertirlo en el otro. Habíanse descubierto con anterioridad "invariantes nodales" de otros tipos, pero el polinomio de Jones fue el primero de una nueva generación de superinvariantes, que realizan su función mucho mejor que sus predecesores.

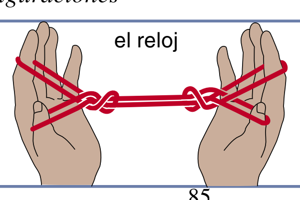
Ahora bien, ni siquiera el polinomio de Jones puede decirnos todo cuanto deseemos saber sobre los nudos y concatenaciones. Estos objetos suscitan cuestiones que no pertenecen a la topología, y a eso quiero referirme este mes. En matemáticas recreativas se tiene la costumbre de ir planteando problemas, para dejarlos pendientes; pero esta vez voy a ir un poco más allá y partir de una recreación situada, en el mejor de los casos, en los márgenes de las matemáticas. Se trata del conocido juego infantil de "la cuna del gato".

He dicho "conocido", aunque son muchos quienes no han caído en la cuenta de la riqueza que encierra. La secuencia completa de la cuna del gato comporta ocho figuras distintas. Son innumerables más las figuras que se pueden construir del mismo modo general, con un simple bucle de cordón entrelazado y retorcido entre los dedos de las dos manos. El juego ilustra hasta qué punto la topología de un bucle de cuerda —el número de nodos, por ejemplo— no alcanza a capturar todo el emporio de sus propiedades geométricas, entre ellas, la forma.

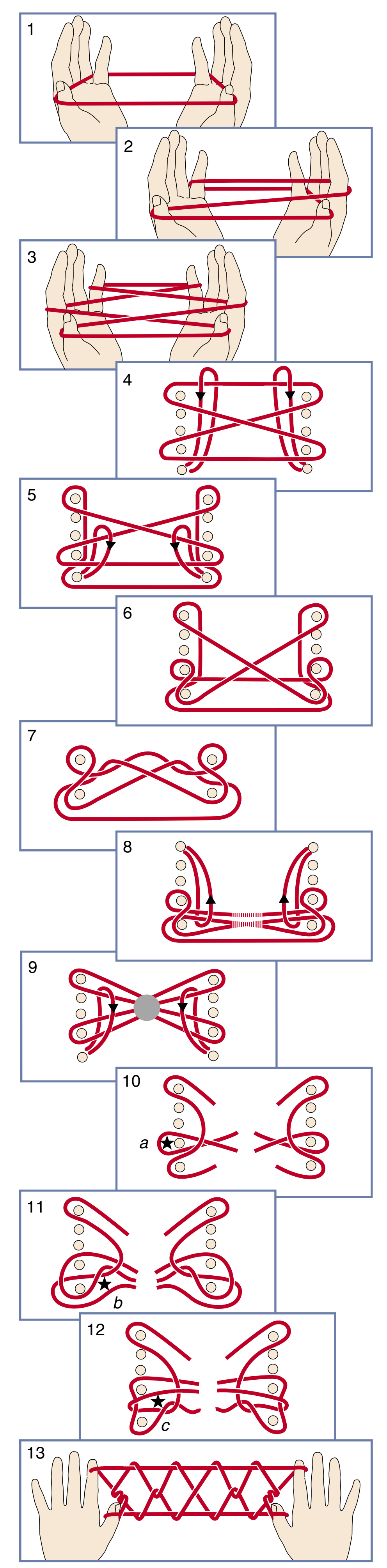
Debería ser posible idear un cálculo pulcro y sistemático para la cuna del gato, un cálculo algebraico que describiera el tránsito desde el bucle de partida, irrelevante, hasta formas más interesantes, efectuando diversas clases de movimientos estándar. Uno de los primeros éxitos en el estudio de los nudos y similares fue la teoría de trenzados, creada por Emil Artin. Una trenza es un sistema de hebras (o curvas) que inicialmente corren paralelas unas a otras. Es lícito, con mayor generalidad, que estas hebras pasen unas alrededor de otras, como en las trenzas del cabello. Artin desarrolló una especie de álgebra para los trenzados, capaz de distinguir trenzas topológicamente no equivalentes. Dos trenzas que tuvieran la misma fórmula algebraica, serían equivalentes; de tener fórmulas distintas, serían no equivalentes. Las ideas de Artin sirvieron, en cierto grado, de inspiración para las de Jones.

Las figuras de la cuna del gato son, en algunos aspectos y hasta cierto punto, parecidas a las trenzas. En lugar de los dos extremos de una trenza tenemos un conjunto de dedos a cuyo alrededor ha de pasar el cordón. Los movimientos lícitos en la cuna del gato son, sin embargo, más variados que los estudiados por Artin: por ejemplo, pueden ser más de una las cuerdas que pasen alrededor de





1. Ocho son las figuras que forman la secuencia completa de la cuna del gato. En el juego hacen falta dos personas, Angela (color más claro) *y Benito* (color más oscuro)*, que retiran cada uno un bucle de las manos del otro. En el texto se dan las instrucciones para crear estas configuraciones*



un dedo cualquiera. Esa es una de las razones de que el álgebra de los trenzados no permita una descripción adecuada de las figuras de la cuna del gato. Otra —quizá menos importante de lo que parece— es que todas las figuras de la cuna del gato son topológicamente equivalentes a un bucle simple y sin nudos.

Sospecho que se puede obviar este problema considerando no sólo el cordón, sino la forma en que es arrollado alrededor de los dedos. Aun así, la versión estándar del juego presenta todavía otra complicación: está permitido que una segunda persona introduzca sus manos en mitad de la figura y la recoja en las suyas, intercambiando la figura formada en las manos de una por otra figura diferente entrelazada en las manos de la otra.

Para "hacerle la cuna al gato" se necesita un trozo de cordón liso y flexible, de un metro más o menos, anudado por los extremos, y, también, un compañero de juego. Supongamos que Angela y Benito van por turnos retirando el bucle de cordón de las manos del otro. Angela empieza haciendo la cuna [*véase la figura 1*]. Hay en la secuencia un movimiento básico, que se repite prácticamente en todos los pasos, y ésta es la primera vez que hay que efectuarlo. Benito se encuentra, por ejemplo, a la derecha de Angela. Al bajar la mirada hacia la figura observa dos cruces de las cuerdas: él los toma, uno en cada mano, y los separa, tirando. Después conduce las cuerdas, alejándolas del centro de la figura, por encima del borde exterior, hacia abajo, hacia dentro y de nuevo hacia arriba a través del hueco del centro.

Al mismo tiempo que Benito aparta las manos y separa sus dedos pulgar e índice, Angela afloja los bucles que le rodean los dedos y deja que el cordón se escape, resbalando sobre ellos. Benito puede tomar ahora la figura entre sus manos. Esta fase se llama "la cama del soldado". Si entonces Angela repite exactamente los mismos movimientos, a partir de esta segunda figura crea con ello la tercera figura, conocida por "las velas".

2. "Los diamantes indios" son una figura que puede ser construida por una sola persona Por ello, la construcción de un cálculo para este juego debería ser más sencilla que para "la cuna del gato". Los puntos representan los dedos de dos manos, a cuyo alrededor se hace pasar el cordón. La secuencia de movimientos (explicada en el texto) es de una complejidad exasperante, pero acaba en un motivo sorprendentemente sencillo

El paso de las velas a la cuarta figura requiere un nuevo movimiento. Benito separa las cuerdas interiores (de lados opuestos) con los dedos meñiques, primero una y luego otra. Después introduce desde abajo los dedos pulgar e índice en el centro de la figura. Este movimiento es parecido al movimiento fundamental, pero ahora no hay que llevarse los cordones que se cruzan. Por último, Benito abre los dedos pulgar e índice y agarra los bucles que rodean sus meñiques doblando los dedos hacia delante. El resultado es el pesebre. A modo de inciso matemático, el pesebre es exactamente igual que la cuna del gato, aunque vuelta hacia abajo.

A partir del pesebre, otra repetición del movimiento básico, pero realizado hacia abajo (es decir, asiendo los cruces desde abajo en vez de hacerlo desde arriba), nos lleva a la cama del soldado, aunque vuelta hacia abajo. El nombre tradicional de esta figura es "los diamantes". Y otra repetición del movimiento básico, esta vez realizado de la forma habitual, hacia arriba, produce el ojo del gato. Asiendo los cordones de forma ligeramente diferente y tirando de las manos hacia atrás sin llevarlas por debajo hacia el centro se acaba con el pez en el plato.

La última figura es más difícil de lograr. Benito se vale de los dedos meñiques para separar los cordones centrales, y recoge después los cruces de la forma habitual. A continuación, vuelve hacia adentro y hacia arriba los dedos pulgares e índices para conseguir la octava figura, el reloj. No tengo ni idea de por qué se llama así. ¿Podrá ayudarme alguno de los lectores?

Utilizando movimientos diferentes se puede cambiar el orden de la secuencia —por ejemplo, pasando directamente de la cuna a las velas o desde la cama del soldado hacia el ojo del gato. Un cálculo eficaz de la cuna del gato debería permitir la explicación de todas estas variantes. Por ejemplo, dos movimientos específicos podrían "ser conmutativos", es decir, producir el mismo resultado a pesar de efectuarse en distinto orden. El objetivo de la teoría debería ser la descripción de las formas reales que toman las cuerdas, y no meramente su topología. Un buen punto de partida podría consistir en la creación de notaciones compactas para las "posiciones" del bucle con relación a los dedos, y para

los movimientos típicos, como el de "tomar un bucle de la mano derecha utilizando el dedo medio de la mano izquierda", o el que sea.

Incluso una sola persona puede crear figuras interesantes; si se pretende idear un cálculo para la cuna del gato, tal vez sea lo mejor empezar por este caso. Para hacer ver cuán fascinantes son las posibilidades, voy a describir una figura conocida por "los diamantes indios". Empieza de forma muy parecida a la cuna del gato, aunque no exactamente igual. Se parte del bucle estándar (*1*); se recoge después con el dedo índice de la derecha la cuerda que pasa sobre la mano izquierda (*2*) y se repite con la otra mano (*3*). A continuación se deja resbalar el bucle sobre los pulgares, doblándolos el uno hacia el otro, al tiempo que, con suavidad, pero sin que el bucle pierda tensión, se van separando las manos. Retuérzanse, haciendo que las palmas miren hacia fuera. Pasaremos los pulgares, llevándolos hacia adelante, por debajo de todas las cuerdas; los engancharemos sobre el cordón de los dedos meñiques y desharemos la torsión de las manos, acercando el dedo meñique hacia el cuerpo (*4*). Este movimiento resulta más natural de lo que se piensa; si lo intentamos, descubriremos que la cuerda que ha de enganchar es "la evidente" para este método.

Ahora pasemos los pulgares por encima de la cuerda que está directamente ante ellos, y después, por debajo de las cuerdas siguientes, para recoger todas ellas con el dorso de los pulgares (*5*), logrando así la forma siguiente (*6*). Dejemos escapar las vueltas de los meñiques doblando los dedos y separando las manos sin brusquedad. El resultado (*7*) es bastante enmarañado, pero desde aquí en adelante se va simplificando. Doblemos los meñiques hacia nosotros, dando la vuelta a las manos si lo deseamos, y cúrvense los dedos sobre la primera cuerda que encontremos (contando desde los índices) y por debajo de la cuerda siguiente a ésa (a partir de los pulgares). Estírense ahora los meñiques (*8*).

En esta fase hay dos bucles en cada pulgar, que es preciso soltar, lo mismo que antes. Hecho esto, el cordón parece mucho más sencillo (*9*), salvo por un nudo complicado en su centro, que es irrelevante. Pasemos el pulgar sobre las dos cuerdas que forman un bucle en el dedo índice, y después por debajo de la cuerda más cercana del bucle del meñique; volvamos al punto donde empezamos. En esta posición es preciso retorcer un poco las muñecas (*10*).

El paso siguiente es poco habitual. Usando los dedos de la mano derecha, recogeremos la cuerda en el punto *a*; la elevaremos sobre el pulgar izquierdo, unos cuantos milímetros nada más. Repitamos entonces con la otra mano. Debe recogerse el tramo situado sobre la cuerda que sale del meñique y se cruza con él. Si se ha realizado correctamente la operación, acabaremos en (*11*) —figura en la que, de nuevo, se han omitido los detalles del nudo central.

Ya casi estamos. El último paso es más fácil de hacer que de explicar. Giremos los pulgares, haciendo que apunten el uno hacia el otro; hagámoslos pasar por los huecos marcados *b* y llevémoslos hacia arriba en el lado cercano. Insertemos después el dedo índice en los huecos marcados *c* en (*12*). Con gran cuidado, dejemos que la cuerda se escurra de los meñiques y volvamos lentamente las palmas hacia afuera para tensar la cuerda. Con un poco de práctica debería conseguirse que los diamantes indios brillaran en todo su esplendor.

Estos dos ejemplos apenas han rozado la superficie de las figuras con cuerdas. A quien desee profundizar se le recomienda hojear *String Figures and How to Make Them*, por Caroline F. Jayne (Dover Publications, 1975). Resulta humillante percatarse de que la topología actual, pese a todas sus increíbles posibilidades, no puede todavía habérselas con un antiguo juego infantil. Y sin embargo, tengo la fuerte sospecha de que las ideas en que se inspira la topología sí pueden estar a la altura del problema. Tal vez pueda el lector afrontar el reto e inventar un cálculo para la cuna del gato. Y en todo caso, puede ejercitar su musculatura matemática creando elegantes figuras a partir de un sencillo anillo de cordón.

Acuse de recibo

La sección de julio estuvo centrada en el descubrimiento de números primos; en la saca del correo recibido aparece una idea que no me resisto a contar. Procede de *Visions of the Future*, una recopilación de Clifford A. Pickover (Science Reviews, Northwood, Inglaterra, 1992); el artículo concreto (páginas 151-157) es "Molecular Biology and Futuristic Problem Solving", por Mels Sluyser y Erik L. L. Sonnhammer, del Instituto Holandés del Cáncer en Amsterdam.

Sluyser y Sonnhammer toman programas utilizados para el estudio del ADN y el ARN y los aplican a secuencias de números primos. Las secuencias de ARN usan solamente cuatro bases —*A*, *U*, *C*, *G*— que se ligan por pares para formar la famosa doble hélice. Es de presumir que las secuencias dotadas de sentido posean cierto grado de no-aleatoriedad, porque las regularidades del ARN pueden hacer que éste se pliegue en configuraciones más estables que las puramente aleatorias. Las configuraciones "regulares" poseen menos "energía libre" que las aleatorias, sin plegar.

El artículo indica que las secuencias de números primos pueden producir resultados de interés al interpretarlas como secuencias en el ARN. Uno de los efectos secundarios es que se manifiestan en los números primos nuevas clases de regularidades. La noción de partida es la "paridad" de un número primo. Se toma un número primo, como el 23, y se expresa en notación binaria, 10111. Se cuenta el número de unos (en este caso, 4) y se determina si ese número es par o impar. En el ejemplo es número par, por lo que 23 tiene paridad "par". Ahora se toma la secuencia de números primos 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, ... , agrupándola por parejas: [2, 3], [5, 7], [11, 13], [17, 19] y así sucesivamente. Al calcular las paridades correspondientes (donde "P" denota "par" y "N" paridad "non") resulta [N,P], [P,N], [N,N], [P,N] ...

Pongamos ahora [N,N] = A, [P,P] = U, [N,P] = C y [P,N] = G, y continuemos con la sucesión de los números primos. (La correspondencia entre pares y bases es arbitraria.) En este caso, los 20 primeros pares producen *CGAGUACCACAUCACACGCA*. Se utiliza ahora alguno de los programas que computan la configuración plegada de una tal secuencia de ARN. La energía libre correspondiente es –256,9 kilocalorías por mol, mientras que las secuencias aleatorias de longitud similar dan lugar, en promedio, a energías libres de –243,6, significativamente menores. Así pues, las técnicas de cálculo de la estructura del ARN sugieren la existencia de regularidades, de alguna clase, en la sucesión de números primos.

NEXOS

James Burke

Sobre raíles

Hace unos días, me encontraba en un tren saboreando una cerveza fría en el bar. Me vino entonces a la memoria el tren de mi niñez, con su ruidoso traqueteo. Hoy los trenes sólo producen un zumbido suave y persistente. Raíles de soldadura continua, me parece que se llaman. Detrás de la barra, en la cafetería, había una nevera "Linde". Recordé haber leído en alguna parte que Carl von Linde, uno de los inventores del frigorífico, le consagró sus frescas intenciones debido a que los fabricantes de cerveza querían mantener frías sus cubas para producir su néctar ambarino en verano. Cuando esto sucedía, Linde trabajaba también como ingeniero de locomotoras. Con coincidencias tan directas supe que tenía resueltos los "Nexos" del mes.

Con toda seguridad, Linde movió algo más que trenes, neveras y cerveza. En 1868 empezó a dar clases en el Instituto Técnico de Munich y un año después sirvió de fuente de inspiración a un estudiante que había tenido una infancia solitaria y mostraba una obsesión por el rendimiento de los combustibles. Los hay para todos los gustos. El joven en cuestión hizo poco por esa fijación mientras vendía los frigoríficos de Linde, hasta 1897, año en que presentó una máquina sorprendente de la que se decía que podía funcionar con cualquier combustible, desde polvillo de carbón hasta aceite de cacahuete. En una Europa hambrienta de petróleo, era ésa una agradable cantinela para los oídos de cualquiera inquieto por los motores mecánicos, que lo mismo podía ser un capitán de fragata que un agricultor avisado. De la noche a la mañana, Rudolf Diesel se hizo rico y famoso. Así que prestemos más atención a los niños con una infancia solitaria y con obsesiones.

Gran parte de la fortuna repentina de Diesel derivó de la venta de los derechos de distribución. Fue un norteamericano, Hiram Maxim quien obtuvo los derechos para el imperio británico y lo hizo tan bien que, al final, se le encumbró a la nobleza. En 1884 fabricó la primera arma de fuego automática, que fue de inmediato incorporada de una u otra forma en el arsenal de todas las grandes potencias militares. Otro caso, como el de Diesel, en el que la humanidad inició un nuevo rumbo (por cierto, Hiram también perfeccionó una trampa para ratones). La pistola de Hiram fue el arma letal que cambió el mundo: con ella se aniquilaron miles de soldados en la Primera Guerra Mundial.

En ningún lado fue más heroica la carnicería que en el aire, donde el arma automática propició la aparición de un nuevo héroe de tebeo: el as de la aviación de combate. El más celebrado de todos fue el temerario aristócrata prusiano Manfred von Richthofen, también conocido por el Barón Rojo. Consiguió ochenta derribos y lideró un escuadrón llamado (antes incluso que los Monty Python) el "Circo Volante". Se le atribuye la siguiente frase: "Cuando derribo a un inglés, mi pasión por la caza se amansa durante un cuarto de hora".

Al final, a Manfred se le concedieron más medallas de las que podía llevar y fue reputado por sus propios oficiales como el único hombre capaz de entrar en barrena para salir de un combate aéreo y saber en todo momento en qué dirección estaba el camino de vuelta.

Esta habilidad también la tenía, en cierta manera, un tío abuelo suyo, Ferdinand, que era geógrafo y que marchó a California, donde informó sobre el filón de Comstock. Después escribió el primer estudio definitivo sobre China, en el que ilustró el efecto de la topografía sobre la economía. Cuando volvió a Alemania se le concedió la cátedra de geografía en Leipzig (gracias a amigos influyentes). La auténtica contribución de Ferdinand al acervo del conocimiento humano fue la invención de la corografía (composición de un área a partir de muchas unidades menores) y la corología (que explica la interacción entre esas unidades).

El sucesor de Ferdinand en la cátedra fue un tipo llamado Ritter, que introdujo la ecuación geográfica. Derivado del romanticismo, su interés por la geografía humana, que él inventó, tiene su origen en la relación entre el hombre y la naturaleza explicada una generación antes por J. G. von Herder, un hombre de letras. También influyó en Ritter el único encuentro que mantuvo con el aventurero y explorador Alexander von Humboldt, que en 1804 acaba de volver de un viaje de cinco años por Sudamérica. Escaló los Andes, encontró el ecuador magnético, la corriente de Humboldt y las fuentes del río Orinoco, además de traerse cientos de mediciones astronómicas. ¿Suficiente? Humboldt también le dio a los mapas el "relieve" que tienen hoy en día. Camino de vuelta, pasó por Virginia e hizo

un alto en Monticello para visitar a su gurú, Thomas Jefferson, otro ecologista precursor.

En realidad Jefferson fue algo más que un ecologista. Fue el tercer presidente de los Estados Unidos y proyectó el edificio del Capitolio en Richmond, Virginia, aunque algunos sostienen que el verdadero autor fue Charles-Louis Clerissau, un gran dibujante francés amigo de Jefferson. Tampoco Robert Adam le hizo justicia a Clerissau. El arquitecto escocés, que hizo del neoclasicismo el estilo de vida de los ricos y famosos (al menos en Gran Bretaña), aprendió mucho de Charles-Louis durante el par de años que pasaron juntos en Italia y Dalmacia dibujando ruinas de la antigüedad, enseñanzas de las que luego sacaría provecho. De vuelta a Gran Bretaña en 1758, Adam tuvo tanto éxito, que pronto empleó tres mil artesanos para afrontar los trabajos de rehabilitación que se le habían encargado. Su truco consistía en hacer de un edificio ruinoso un Partenón.

Uno de los artesanos contratados por Adam fue Matthew Boulton (el que luego sería socio de James Watt) especializado en ormolu, una aleación de cobre, zinc y estaño de color dorado, y en todo tipo de estructuras metálicas de decoración. Boulton tenía una compañía que fabricaba de todo, de hebillas para zapatos a empuñaduras de espada. Por ello, en 1786 sabía qué se necesitaba para fabricar máquinas de vapor que acuñaran moneda, en un momento en que el gobierno estaba alarmado por los niveles que había alcanzado la falsificación. Las máquinas de Boulton podían acuñar hasta ciento veinte monedas por minuto, en función de la complejidad del diseño. En 1792 tenía ya contratos con las Compañía de las Indias Orientales, la Compañía de Sierra Leona, las colonias americanas, Francia, Bermuda y Madras. Cinco años después, la casa de la moneda británica le encargó la fabricación de sus monedas de dos peniques, un penique y las fraccionarias de medio y un cuarto.

En 1816, la casa de la moneda se decidió por la elegancia y consultó a un grabador italiano, Benedetto Pistrucci, que se llevó con él una máquina reductora. Pistrucci realizó primero un modelo a gran escala en hierro colado y después con un puntero ligado a un brazo rígido repasó los contornos. En el otro extremo del brazo, un torno reproducía una versión en miniatura del modelo sobre una plancha metálica a tamaño natural. Pistrucci utilizó el aparato para grabar por primera vez en la corona británica a San Jorge y al Dragón. Pero esta nueva imagen clásica no bastó para que Pistrucci obtuviera el trabajo de grabador jefe. Al fin y al cabo era un extranjero.

Algunos años después, Pistrucci, frustrado y amargado, murió. Los diseños de moneda se realizaron por electrogalvanización y se emplearon planchas de acero, gracias a la labor de William Roberts-Austen, nuevo jefe de la casa de la moneda y entusiasta de las aleaciones. En su honor se llama austenita una de sus aleaciones de acero. Cuando terminó de hacer dinero fabricando moneda, colaboró en la construcción de ese tren mío de movimiento tan uniforme sobre raíles de acero.

Y yo me bajo en ésta.

LIBROS

Láseres

Manual didáctico

LASER FUNDAMENTALS, por William T. Silfvast. Cambridge University Press; Cambridge, 1996.

Tengo en mis manos un libro recientemente editado para la enseñanza del láser, y dirigido a estudiantes de los últimos cursos de la licenciatura en físicas y probablemente de los de ciertas especialidades de ingeniería de telecomunicaciones. Su autor se ha centrado en los conceptos básicos para entender el funcionamiento de un láser, sin tocar otros puntos, que aun siendo importantes (como los relativos a la naturaleza cuántica de la luz), no son imprescindibles para lograr el objetivo que pretende.

Un sistema láser presenta tres ingredientes básicos, a saber, un medio activo (gaseoso, líquido o sólido), un mecanismo de bombeo y un resonador. William T. Silfvast desarrolla por extenso cada uno de esos componentes en su obra. Parte de la radiación luminosa y de su interacción con la materia, desde un punto de vista clásico y cuántico. Quizás en la parte clásica se echa de menos cierto detalle (sólo dedica un capítulo) en la explicación del alto brillo del láser y su alta coherencia temporal y espacial.

La parte cuántica, en cuatro capítulos, recibe mayor atención. El primero de ellos es un recordatorio de la cuantificación de la materia, centrándolo en el átomo. En el segundo aborda los procesos radiativos y los distintos mecanismos que producen ensanchamiento espectral. El tercero complementa al primero y resulta de gran ayuda al no iniciado; resume con nitidez la distribución de los niveles energéticos en moléculas, líquidos y sólidos. Se ocupa, por último, de los procesos de absorción y emisión estimuladas tomando como punto de arranque la radiación del cuerpo negro.

El tercer bloque del libro se centra en el fenómeno de la amplificación de la luz y su obtención cuando hay inversión de población. Se barajan aquí conceptos fundamentales como los de inversión de población, saturación, ganancia y condiciones umbrales de oscilación, que convendría ordenar y explicar mucho mejor, si queremos que el lector presumible (alumnos de físicas y de ingeniería de telecomunicaciones) se entere de cómo opera un sistema láser. Los dos últimos capítulos de este bloque introducen el mecanismo de bombeo y las técnicas experimentales básicas para producir dicho bombeo.

A lo largo de tres capítulos se extiende la explicación del resonador. Expuestos los conceptos de modo transversal y modo longitudinal, así como las propiedades de los modos láser, se ocupa de los resonadores estables y el análisis de haces gaussianos. Estudia, por último, las cavidades especiales, la noción de láser pulsado y los métodos básicos de obtención de pulsos láser.

El quinto bloque del libro está dedicado a los sistemas láser más típicos. Esta parte, muy bien estructurada, se divide en dos según la densidad del medio activo (gas o líquido-sólido). Se agradece un apartado de aplicaciones detallado para cada uno de los láseres. El autor dedica el último bloque del libro al análisis de procesos no lineales. Este, a mi entender, es de carácter puramente informativo y requiere, en su caso, un análisis más profundo y detallado.

La bibliografía que incluye el autor es escasa pero bien seleccionada. Cita como básicos el libro de A. E. Siegman y el de P. W. Milonni y J. H. Eberly y se echa en falta la cita a un libro clásico de láser, como es el de Orazio Svelto. La colección de problemas al final de cada capítulo resultará de enorme ayuda al tutor que siga este libro. En resumen, diría que estamos ante un buen libro para la enseñanza del láser, del cual destacaría dos cualidades. Una, el sumario al comienzo de cada capítulo, y otra, los ejemplos, tablas, figuras, etc. y el detalle con el que se realizan las operaciones matemáticas con el correspondiente manejo de dimensiones y órdenes de magnitud de las variables. Esto confiere al libro una gran utilidad y un enorme sentido didáctico.

FERNANDO MORENO GARCÍA

Citogenética

Cosecha

THE FABRIC OF LIFE. MICROSCOPY IN THE SEVENTEENTH CENTURY, por Marian Fournier. The Johns Hopkins University Press; Baltimore, 1996. **THE CELLS OF THE BODY. A HISTORY OF SOMATIC CELL GENETICS**, por Henry Harris. Cold Spring Harbor Laboratory Press; 1995. **DISCOVERING MOLECULAR GENETICS**. por Jeffrey H. Miller. Cold Spring Harbor Laboratory Press; 1996.

GENES, por Benjamin Lewin. Oxford University Press; Oxford, 1997. **LANDMARKS IN GENE REGULATION**. Dirigido por D. S. Latchman. Portland Press; Londres, 1997.

FROM GENES TO CELLS, por Stephen R. Bolsover *et alii*. Wiley-Liss; Nueva York, 1997. **CELLS, EMBRYOS, AND EVOLUTION**, por John Gerhart y Marc Kirschner. Blackwell Science; Oxford, 1997. **PATTERNS AND PROCESSES OF VERTEBRATE EVOLUTION**, por Robert L. Carroll. Cambridge University Press; Cambridge, 1997.

A paso firme, la citogenética, ciencia balbuciente a comienzos de siglo cuando se augura una era nueva para la biología, llega, coronado éste, a su plena sazón. Mas, como casi todo lo que ha pervivido, hinca sus raíces últimas en la revolución científica. Aquí reza el tópico —y reza bien— que lo que el telescopio supuso para la astronomía, eso mismo significó el microscopio para la biología. No sólo fue cuestión de equipotencia. De la invención del telescopio nació, en 1610, el microscopio. Fue su cuna, recuerda Marian Fournier en *The Fabric of Life*, la holandesa Middelburg y velaron por su primeros pasos Zacaharias Jansen, Hans Lipperhey y Jacob Metius. Pero, a diferencia del telescopio, que al poco de su creación lo aplicó Galileo para examinar los cielos y, con tales observaciones, redactar el *Sidereus nuncius*, el microscopio llevó una vida lánguida hasta que cumplió los 50 años. O quizá la han desconocido los historiadores, que es lo que algunas investigaciones en curso empiezan a vislumbrar.

En los primeros microscopios —un tubo móvil asentado sobre un trípode— el objetivo lo formaba una lente plano-convexa y, el ocular, una lente doblemente convexa. Se resentían de dos limitaciones impuestas por las leyes de refracción: la aberración esférica y la aberración cromática. Si con habilidad técnica podía corregirse la esférica, la aberración cromática —sostenía Newton— resultaba inevitable; si acaso, amortiguarse con el empleo de diafragmas.

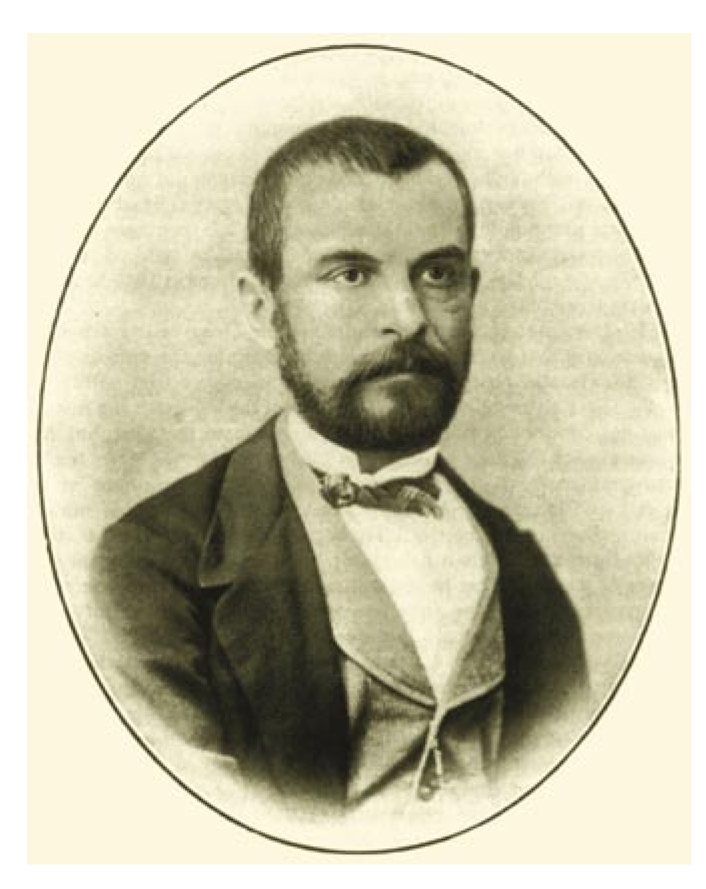
Las mejoras técnicas multiplicaron la capacidad de observación. En 1654 Huygens estimaba los aumentos de su microscopio compuesto en 56 diámetros. Divini afirmaba en 1667 que su modelo de doble ocular podía aumentar 41, 90, 111 o 143 veces, según fuera la distancia del objetivo. Sin embargo, entre 1670 y 1750 el rendimiento de los microscopios no experimentó ningún avance significativo. Salvo la fama que acompañó, por su poder de resolución, a los salidos de las manos de Leeuwenhoek.

Si antes de 1660 las observaciones microscópicas satisfacían curiosidades lúdicas, en adelante se aplican al estudio sistemático de la estructura orgánica. Refleja esa orientación el descubrimiento por Robert Hooke de los poros o células en el corcho. Nehemiaw Grew preparó cortes finos en ángulos distintos procedentes de la raíz, tallo, hojas y otras partes de la planta. La textura de tejidos animales hacía, empero, más difícil el corte fino. Para superar ese obstáculo e investigar al microscopio la textura del hígado, riñón, cerebro, piel y otros órganos, se emplearon técnicas habituales en anatomía macroscópica: ebullición, maceración e inyección con cera, mercurio o yeso. Marcello Malpighi inyectaba las arterias con tinta antes de ponerlas en la platina. Leeuwenhoek empleó azafrán para colorear tejido muscular.

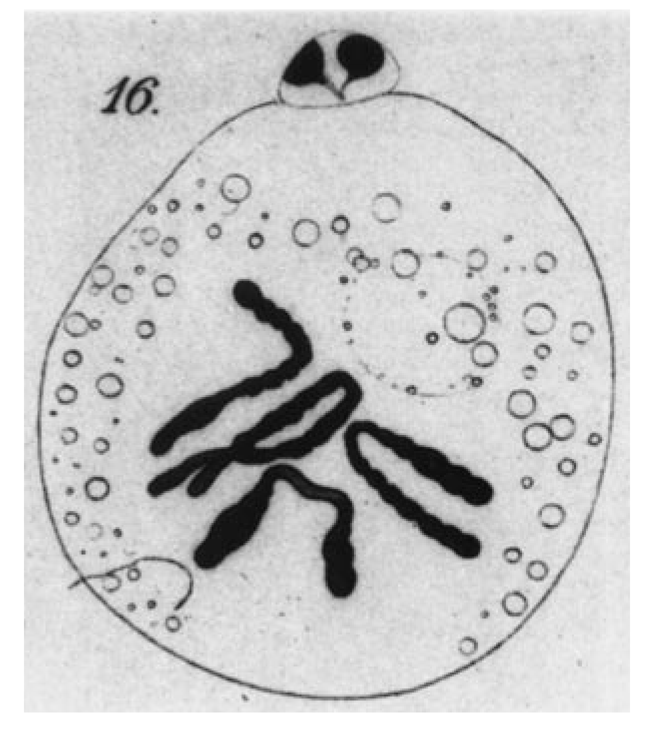
A menudo, descripciones e ilustraciones de lo observado se imbricaban en un mismo relato expositor. Hubo que crear una nueva terminología para las estructuras emergentes y convenciones arbitrarias para la ilustración microscópica. En un comienzo, una misma estructura recibía distinto nombre según la percepción del observador. “Célula”, “poro”, “vejiga”, “utrículo” y “glóbulo” se utilizaron indistintamente para denotar la célula vegetal. A la inversa, un solo término podía aplicarse a estructuras dispares. La palabra “glóbulo” designaba la célula vegetal, el eritrocito, la gota de grasa y cuanto se les asimilara.

En busca de una posible zona última, microscópica, donde plantas y animales convergieran se desencadena a lo largo del XVIII una avalancha de tesis académicas y memorias sobre la formación de los organismos, su gradación y comparación mutua. Tendencia que se prolonga, con otro enfoque, en el primer tercio de la centuria siguiente, punto de partida de *The Cells of the Body*. Concepción de la vida y el mundo (*Naturphilosophie)* y observación microscópica se funden para dar una explicación verosímil de las unidades básicas. En 1805 Lorenz Oken propone que las entidades últimas son los “infusorios”, nombre de perfiles borrosos que incluía protozoos y bacterias. En los infusorios se renueva y desaparece cada día el caos de la creación. Surgen allí donde se descomponen animales o plantas, es decir, se amasan *de novo* a partir de materia orgánica. Posteriormente, Oken sustituyó el término infusorios por el de *Urbläschen* (vesículas primarias). Así, dirá que el desarrollo de la planta viene causado por la multiplicación de *Urbläschen* que se elongan debido a la polaridad del vegetal y acaban por diferenciarse en tejidos.

Oken se inspiró en Abraham Trembley, quien en 1766 había descrito ya la división de la diato-



Debemos a Wilhelm Hofmeister (1824-1877) las primera descripción precisa de las fases de la mitosis



Los cuatro cromosomas de Ascaris megalocephala*, observados por Edouard van Beneden*

mea *Synedra*. Sin apenas solución de continuidad se sucedían las descripciones de especies unicelulares que mostraban un parejo modo de multiplicarse. Pero una demostración rigurosa de la división en los organismos pluricelulares sólo llegó con Barthélemy Charles Dumortier, en 1829. Afirma, en *Recherches sur la structure comparée et le développement des animaux et des végétaux*, que las nuevas células surgen por división de otras progenitoras, que ese proceso ocurría sólo en las células apicales del filamento y que acontecía por una partición que escindía la nueva célula de la vieja.

Visto en retrospectiva, se hace difícil entender el escaso eco de las ideas de Dumortier sobre la constitución de las plantas y el papel de la división celular en su desarrollo. Harris atribuye dicho silencio al carácter particularista de las conclusiones de Dumortier, comparadas con las hipótesis propuestas, diez años más tarde, por Schleiden y Schwann. La verdad es que los trabajos de estos últimos, sin restarles un ápice de su importancia en el establecimiento de la teoría celular, enredaron muchísimo la hipótesis sobre generación de nuevas células. Schleiden creía que éstas se formaban *de novo* a partir de una solución viscosa donde aparecían gránulos que progresivamente se agrandaban para convertirse en nucleolos. Luego emergía el material que iba a generar la célula (el *Cytoblastem*) e inducía la formación de vesículas que poco a poco se iban distendiendo. Estas vesículas distendidas acababan por desarrollarse en células. Schwann creía también que el nucleolo era la primera estructura en surgir y que el núcleo se organizaba en torno al *Cytoblastem* por un proceso similar al de la cristalización. El resto de la célula se congregaba entonces en torno al núcleo y terminaba, por fin, aislándose del contorno mediante la membrana celular. Para Schwann, ahí radicaba el principio universal que gobernaba el desarrollo de todos los componentes elementales de los organismos.

Por lo que concernía a las células vegetales Unger desmoronó la artificiosidad de las explicaciones de Schleiden. Todos los tejidos de la planta resultaban de la división celular meristemática. En el ámbito de las células animales, Robert Remak se encargó de barrenar el "principio universal" de Schwann. En un artículo magistral de 1852 Remak señalaba que la tesis de la formación de las células animales *de novo* le parecía tan improbable como la de la *generatio aequivoca* de los organismos unicelulares. Los eritrocitos —cuya génesis había estudiado— no surgían *de novo*, sino por división de células preexistentes. Como corroboraría tres años más tarde Virchow, *omnis cellula e celulla*.

Antes del ecuador del siglo se conocía la división del núcleo y la mitosis. En 1847 Reichert observó la disolución de la membrana nuclear en el zigoto del nemátodo *Strongylus auriculatus*. Distinguió también la presencia de nuevos núcleos en las células hijas. Un año después Hofmeister ilustraba la secuencia de la mitosis. Hasta siete fases contaba: cambios morfológicos en el núcleo, disolución de la membrana nuclear, reunión de material nuclear, anafase, reconstitución de los núcleos hijos, formación de una nueva membrana nuclear y partición de la célula en dos.

Abrió surco hacia la citogenética E. G. Balbiani en 1876, cuando advirtió el alcance mecánico de la transformación del núcleo. En las células mitóticas del epitelio del ovario del saltamontes *Stenobothrus*, percibió que la sustancia nuclear se recogía primero en un haz de bastones, cada uno de los cuales se partía luego en dos. W. Schleicher confirmaba al poco una secuencia similar en células cartilaginosas de renacuajos y en 1879 detallaba los hitos del ciclo: profase, metafase, anafase, telofase y reconstitución del núcleo. Schleicher acuñó el término carioquinesis para describir esa secuencia de acontecimientos.

El trabajo clásico de Edouard van Beneden sobre fecundación y maduración del huevo apareció en 1883. Fue una suerte que diera con el material que ni pintiparado para entender el papel de los cromosomas en el proceso de la fecundación. Los huevos de *Ascaris megalocephala*, amén de transparentes, poseen sólo cuatro cromosomas de talla notable. Theodor Boveri revelaría que los cromosomas portan cargas genéticas distintas y esa estabilidad se transmite de una generación a otra.

Harris llega en su exposición hasta nuestros días, pero deja huecos que hemos de llenar con *Discovering Molecular Genetics*, espléndida antología de la materia antes de dominarse las técnicas de secuenciación del ADN. Retrotrae el origen de la nueva genética a los años cuarenta. Avery había mostrado que el material genético —el principio transformante descubierto por Griffiths en 1928— no eran proteínas sino ADN. Con la hipótesis de Beadle y Tatum de un gen-una enzima se admitía que el material genético controlaba la estructura de las proteínas. El descubrimiento de Lederberg y Tatum de la conjugación y el hallazgo de Lederberg y Zinder de la transducción permitió nada menos que experimentar en genética bacteriana. Llegó el primer fruto: se producían mutantes estables. Luria y Delbrück mostraron que, además, eran espontáneos en los cultivos bacterianos.

En 1953, Watson y Crick explicaron la estructura del ADN, con lo que se daba carpetazo a la genética bacteriana formal —tan fecunda en su breve vida— y comenzaba el estudio de la estructura molecular del material hereditario. Se reconocía la existencia de un código lineal para convertir la secuencia de nucleótidos del ADN en la secuencia de aminoácidos de una proteína. Las propiedades de emparejamiento de las bases sugerían varios mecanismos de mutagénesis; sugerían también de qué modo el material genético se autorreplicaba.

Al doblar ese decenio, Seymour Benzer pergeña la estructura fina del gen. Admitíase hasta entonces que los genes eran indivisibles y constituían las unidades últimas de recombinación, mutación y función. Los genes podían tener diferentes estados alélicos, pero esos alelos representaban el gen total, no partes del mismo. Sin embargo, la estructura del ADN de Watson y Crick apuntaba ya a los pares de bases como puntos de mutación. La obra de Benzer tendió el puente entre la visión clásica del gen como unidad indivisible y la estructura de Watson-Crick. Lo hizo al demostrar que el gen constaba de una serie lineal de elementos, cada uno de los cuales podía mutar y recombinarse. Podían, pues, darse mutaciones diferentes (alelos) en el seno del mismo gen y recombinarse entre sí. La unidad última de mutación y recombinación era el par de bases.

En 1961, Crick y Sydney Brenner determinaron la función triplete en el código genético, a través de fascinantes experimentos en los que contaron con la ayuda de otros investigadores. Demostraron que el código se lee desde un punto fijo, carece de comas y se sirve de tres bases, o de un múltiplo de tres, para cifrar un aminoácido. Se trata, además, de un código altamente degenerado, en el que pueden emplearse varios codones para un mismo aminoácido.



Leuconia palaoensis



Carybdea alata



Branchiostomae floridae

Ese mismo año de 1961 François Jacob y Jacques Monod publicaron sus trabajos sobre el modelo del operón de regulación génica. El fenómeno que inspiró la idea fue el de la inducción enzimática. Se había observado que en algunos casos las enzimas bacterianas se encontraban sólo en presencia de sus sustratos específicos. Tras demostrar que la inducción implicaba la síntesis de nuevas moléculas de la enzima, abordaron la cinética de la inducción. Se avivaba la síntesis de enzimas si se agregaban inductores; se detenía, en cuanto éstos se eliminaban. Parecía palmario que el inductor activaba la producción de un intermedio estable que se acumulaba en la célula. Tras establecer que la síntesis enzimática se bloqueaba con una molécula represora, Monod y Jacob supusieron que en el ADN debía haber un sitio que interactuara con el represor.

Una vez esbozado el perfil general del código genético se atacó el problema de la colinearidad: la prueba de la tesis que sostenía que la secuencia lineal de nucleótidos en un segmento de ADN (un gen) se traducía en una secuencia lineal de aminoácidos en el polipéptido correspondiente. El camino obvio para comprobarlo era mostrar que las mutaciones se reflejaban en el mapa génico en el mismo orden lineal que los aminoácidos alterados en las proteínas correspondientes. Decisivo a este respecto fue el trabajo de Charles Yanofsky en 1963.

Establecidos los principios moleculares, se avanzó con suma celeridad. Lo compendia *Genes*, de Lewin. El gen es la unidad de información hereditaria. Para su perpetuación y expresión se apoya en las leyes de la física y la química. Un gen se define como la secuencia de ADN necesaria para la síntesis de una proteína. Ahora bien, si los genes cifran proteínas, éstas a su vez son responsables de la síntesis de otros tipos de estructuras (incluidos los ácidos nucleicos). Pero las características estructurales individuales no son los únicos determinantes de las funciones de una molécula. Su instalación en un lugar determinado importa también.

De la comparación de las secuencias de ADN y proteínas se deduce que son colineales en los procariotas, pero en los eucariotas las regiones codificadoras pueden interrumpirse. Un gen eucariota interrumpido consta de exones que se hilvanan juntos en ARN, por eliminación de los intrones. Las pautas alternativas de expresión génica permiten que una sola secuencia de ADN represente más de una secuencia de proteína.

La molécula de ADN, de longitud de suyo indefinida, abarca un diámetro de 20 angstrom. En comparación, una proteína de 50 kilodalton, dispuesta en esfera, tendría un diámetro de unos 50 angstrom. Las proteínas que operan en la expresión génica mediante la síntesis de ARN o la replicación de ADN pueden ser mucho mayores. La ARN polimerasa bacteriana es de 500 kilodalton y la ADN polimerasa de 900 kilodalton; tienen dimensiones del orden de los 100-200 angstrom.

Si los genes se hallan expuestos a mutaciones, las proteínas admiten modificaciones. Menudean, entre éstas, la fosforilación, la acetilación y la metilación. En la fosforilación se agrega un grupo fosfato, por lo común al grupo hidroxilo de la serina o la tirosina. El grupo fosfato introduce cargas negativas y, por tanto, tiene un efecto significativo en las propiedades electrostáticas de la proteína. La acetilación y metilación ocurren, casi siempre, en el aminoácido lisina. Un cambio más profundo en la estructura acontece cuando se produce la glicosilación, por la que una cadena lateral de hidrato de carbono se agrega a un aminoácido.

Rasgo característico de una proteína es su capacidad para plegarse en una conformación tridimensional. Cada proteína existe en una sola conformación (o a veces en una serie de conformaciones alternativas). De la configuración adquirida responden distintos enlaces no covalentes, que en concreto son los iónicos, los puentes de hidrógeno, las interacciones hidrofóbicas y la atracción de van der Waals.

Veinte años atrás no se sabía que las células eucariotas poseyeran proteínas reguladoras que se unieran a una secuencia de ADN específica de un gen diana y controlasen su expresión. De entonces acá, una batería sorprendente de factores de transcripción, así se llaman, se han ido definiendo. Abrieron el nuevo horizonte otro haz de artículos fundamentales, agavillados en *Landmarks in Gene Regulation*.

Todo empezó al reflexionar sobre cierto fenómeno que parecía atentar contra el dogma central de la biología molecular, según el cual la información del ADN dirige la síntesis de proteínas específicas por intermedio de una molécula de ARN. O lo que es lo mismo, el ADN produce ARN que produce proteína. El hecho era que las técnicas bioquímicas mostraban que los tejidos diferían entre sí en razón de su contenido proteico. Había enzimas, por ejemplo, que sólo las sintetizaba determinado tipo celular, pero no otros; dígase lo propio de las hormonas. ¿Significaban esos hallazgos que, de acuerdo con el dogma, concurrían también dichas diferencias en la concentración de ARN y ADN? La observación lo cuestionó al comprobar que las poblaciones de ARN sí variaban de un tejido a otro, por más que el contenido de ADN se mantenía inalterable.

Cabía suponer, para resolver la paradoja, que la regulación génica se ejerciera desde algún punto entre el ADN y la producción final de ARNm. Se descubrió que el control de marras operaba en la fase de transcripción. Ello no obsta para que se presenten casos de regulación posterior a la transcripción, mediante un proceso de corte y empalme alternativo, mediante la regulación de la estabilidad de ARNm o mediante la traducción.

Phylum	Especie	Genoma (pares de bases)
Alga	*Pyrenomas salina*	$6{,}6 \times 10^5$
Micoplasma	*M. pneumoniae*	$1{,}0 \times 10^6$
Bacteria	*E. coli*	$4{,}2 \times 10^6$
Levadura	*S. cerevisiae*	$1{,}3 \times 10^7$
Moho	*D. discoideum*	$5{,}4 \times 10^7$
Nemátodo	*C. elegans*	$8{,}0 \times 10^7$
Insecto	*D. melanogaster*	$1{,}4 \times 10^8$
Ave	*G. domesticus*	$1{,}2 \times 10^9$
Anfibio	*X. laevis*	$3{,}1 \times 10^9$
Mamífero	*H. sapiens*	$3{,}3 \times 10^9$

Tamaño genómico de animales de experimentación

El trabajo seminal sobre factores de transcripción lo realizaron Nicholas D. Hastie y John O. Bishop en 1976. Investigaron la concentración variable de ARN mensajero en los tejidos de ratón, siguiendo el análisis establecido por el segundo dos años antes. A grandes rasgos, en el método de Bishop se forma ADN complementario (ADNc) del ARN utilizando moléculas precursoras radiactivas; luego, se disocian el ADNc y el ARN. Se controla, a continuación, el ritmo con que el ADNc se reanilla o se hibrida con el ARN. Pensaron con acierto que este mismo método podía emplearse para examinar la concentración de diferentes ARN dentro de una población determinada.

Los genes adquieren pleno sentido en su marco celular (objeto de *From Genes to Cells*), dentro de una perspectiva evolutiva de la vida (según se trata en *Cells, Embryos, and Evolution* y en *Patterns and Processes of Vertebrate Evolution*).

Las células, unidades elementales de la organización del ser vivo, evidencian una sorprendente diversidad. Unas prefieren la soledad, otras la asociación colonial o comunitaria. Algunas presentan un perfil geométrico definido, muchas se expanden en contornos flexibles. Las hay que nadan, reptan o son sedentarias. En cuanto a coloración, existen verdes, rojas, azules, violáceas o incoloras. Pese a tamaña diversidad se reducen, sin embargo, a dos tipos: procariotas y eucariotas.

Las de la mayoría de los organismos, de los protozoos a los mamíferos y de los hongos a las plantas, son *eucariotas*. Presentan un diámetro de 5 a 100 micrometros. Alojan orgánulos encerrados en membranas, el principal de los cuales, el núcleo, contiene el material genético. Núcleo y mitocondrias pueden observarse con el microscopio óptico; se requiere un microscopio electrónico para percibir la naturaleza de estructuras celulares menores. Prototipo de célula procariota es la bacteriana. Sin apenas organización interna, mide de uno a dos micrometros de diámetro.

Las membranas delimitantes constan de bicapas lipídicas que contienen proteínas. El interior de la membrana aporta un entorno hidrofóbico que contrasta con el entorno acuoso de la parte exterior. Algunas proteínas de membrana son receptores que trasladan señales de un lado a otro, por lo común desde el exterior hacia el interior celular. Pero la arquitectura general de la célula viene apuntalada por el citoesqueleto, red de fibras de actina, microtúbulos y filamentos intermedios.

La separación más llamativa entre células eucariotas se da entre animales y vegetales. A diferencia de los límites flexibles de las células animales, las vegetales se protegen en una rígida pared. Las fotosintéticas cuentan, además, con un orgánulo especial, el cloroplasto, donde se albergan los sistemas recolectores de la luz y generadores de hidratos de carbono.

Desde el nacimiento de una célula por división de su progenitora hasta el tiempo en que ella misma se divide a su vez transcurre un ciclo, que suele fraccionarse en cuatro partes muy definidas: fase S, período en que se produce la síntesis de ADN; fase M (de “mitosis”) o período de división celular, y los intervalos (“gaps”) entre ambas (G1 y G2). La entrada en la fase M está controlada por una kinasa de proteína, que sólo se muestra activa cuando se une a otra proteína, la ciclina B.

Amén de la división individual, hemos de considerar la transformación celular en el curso evolutivo. La verdad es que los mecanismos de cambio celular son los eslabones perdidos en la manifestación de la selección natural en el tiempo. Podemos imaginarnos mamíferos volviendo al mar y prescindiendo de sus extremidades, o aves que transforman sus dedos en

alas, pero ignoramos qué cambios genéticos y celulares subyacieron bajo tales eventos.

Si miramos a los eucariotas, advertiremos una paradoja que no ha recibido suficiente atención entre los estudiosos. A saber: el llamativo contraste entre la extrema conservación de los procesos celulares y de las funciones de las proteínas, por un lado, y el derroche de morfologías y comportamientos, por otro. (Gracias a la ausencia de pared en las células animales y su capacidad consiguiente para formar láminas epiteliales cerradas, los metazoos pudieron ensayar, en el curso evolutivo, múltiples esbozos de formas.) Si atendemos a los procariotas, la antinomia es de signo opuesto: amplio abanico de capacidades metabólicas frente a una modesta diversificación morfológica.

Nos topamos ya con el problema de la conservación en la primera gran radiación de metazoos, llamada del Vendiano y fechada hace entre 550 y 600 millones de años. Fue una auténtica eclosión de morfologías inéditas. Sin embargo, brillan por su ausencia las señales de una correlativa explosión molecular. Lo que viene a indicarnos que antes de la divergencia de los grandes phyla, se habían asentado la mayoría de las familias de genes, la mayoría de los sistemas de señalización, los circuitos de transcripción y los principios de diferenciación celular y formación de los tejidos.

Además, en todos los linajes principales, observamos que los primeros miembros desenterrados gozan del plan corporal básico que caracteriza a sus descendientes de nuestros días. Diferían sólo en detalles secundarios. Y ello vale lo mismo para invertebrados (pensemos en los trilobites) que para los cordados. Ni siquiera las plantas vasculares se apartan del guión. Aparecen de repente en el registro fósil un número limitado de grandes grupos y luego persistieron sin apenas cambios decisivos durante cientos de millones de años.

A las pautas evolutivas de los metazoos superiores dedica *Patterns* lo mejor de sus páginas, en un empeño por recoger el testigo del clásico *Major Features of Evolution* de Simpson.

Baraja el comportamiento con el desarrollo embrionario, la deriva continental con la variabilidad específica, la extinción de grupos con la selección de otros, al objeto de desentrañar la transición de peces a anfibios, de dinosaurios a aves, de los mamíferos terrestres a las ballenas. En la biología del desarrollo se confía hallar la luz que alumbre los mecanismos de las transformaciones estructurales a gran escala. A este respecto, el conocimiento de los sistemas reguladores revelados por los genes *Hox* demuestra una pauta jerárquica de control que ilustra las interrelaciones entre mutaciones y selección.

Ubica en sus límites debidos el dominio respectivo de la microevolución y la macroevolución. Se caracteriza la primera por varios rasgos: circunscribe su radio de acción a las poblaciones, coexiste con períodos de estasis y la cadencia de cambio se acerca bastante de un linaje a otro. La macroevolución se basa en el estudio del registro fósil y se distingue por la eclosión repentina en el registro fósil de los grandes linajes, que persisten durante largos intervalos encuadrados en el mismo marco estructural, el cambio evolutivo es muy rápido en los momentos originarios de los grandes grupos para enlentecerse hasta el desconcierto en el seno de un mismo grupo; hay hiatos significativos que separan pautas estructurales y adaptativas que caracterizan a los taxones más generales.

Los vertebrados presentan ventajas evidentes para convertirlos en modelos en el estudio de los procesos evolutivos a largo plazo. Se trata, en primer lugar, de un grupo monofilético, es decir, comparten un antepasado fundante común, lo que nos faculta para cotejar estructuras y procesos fisiológicos homólogos. En segundo lugar, evidencian un solo patrón de reproducción, que implica la recombinación de los gametos de los dos sexos. Casi todos los vertebrados son de vida libre; nunca forman colonias, ni parasitan propiamente.

LUIS ALONSO

Diccionarios

Especializados

DICCIONARIO AERONÁUTICO CIVIL Y MILITAR ESPAÑOL-INGLÉS, por José Velasco Sales. Ministerio de Defensa; Madrid, 1995.

Poca cosa puede comentarse acerca de este libro que apenas sea una extensión del contenido de sus páginas de presentación. Se trata, es obvio, de una obra absolutamente especializada. Su objetivo de constituir una herramienta práctica y útil para quienes desarrollan alguna actividad relacionada con el ámbito de la aeronáutica y astronáutica y sus ciencias y técnicas conexas (comunicaciones, electrónica, ingeniería, mecánica, informática, meteorología, etc.), personas cuyo conocimiento en mayor o menor grado de la lengua inglesa es algo que hoy día se da por descontado, lo consigue el autor a lo largo de las 65.000 entradas que conforman el diccionario, el contenido de las cuales, dentro de la especialidad, rebasa en lo que es más específico de la misma a lo que pueda encontrarse en los diccionarios politécnicos más desarrollados.

Por lo que tiene de herramienta de trabajo, es condición indispensable, y diríase que casi única, que todo diccionario sea de manejo sencillo. En este caso ello se consigue mediante una presentación, agradable y directa, a modo de glosario, que abarca no sólo los vocablos y expresiones propias de la especialidad, sino también otros que, aun no siendo propios de ella, guardan alguna relación con cada tema.

Constituye una aportación a la facilidad de uso del diccionario el hecho de que las entradas no se hayan agrupado en forma de árbol, o de entradas de segundo nivel, ni siguiendo un criterio de afinidad fenomenológica. Antes al contrario, las entradas son independientes y el autor las coloca en orden estrictamente alfabético. Así, por ejemplo, el conjunto de las 125 entradas iniciadas por la palabra “campo” empieza con la sola palabra “campo”, con las acepciones “airfield, af (abrev), camp, cp (abrev), field, fd (abrev)”, para acabar con “campo visual de la cámara”, por “camera lines”; ello pasando por expresiones tan intrínsecamente dispares como “campo de búsqueda”, “campo de minas”, “campo de propagación”, “campo difuso”, “campo magnético constrictor” o “campo troposférico disperso”.

Es ésta sin duda una obra absolutamente recomendable para los profesionales, recomendación que hacemos extensiva a los aficionados a estos temas, ya que su afición es seguro que muchos de ellos la alimentan en buena parte con la lectura e intercambios con publicaciones y otras fuentes de información en lengua inglesa. Se trata, en suma, de un trabajo avalado por la ejecutoria profesional del autor.

JOSÉ VILARDELL

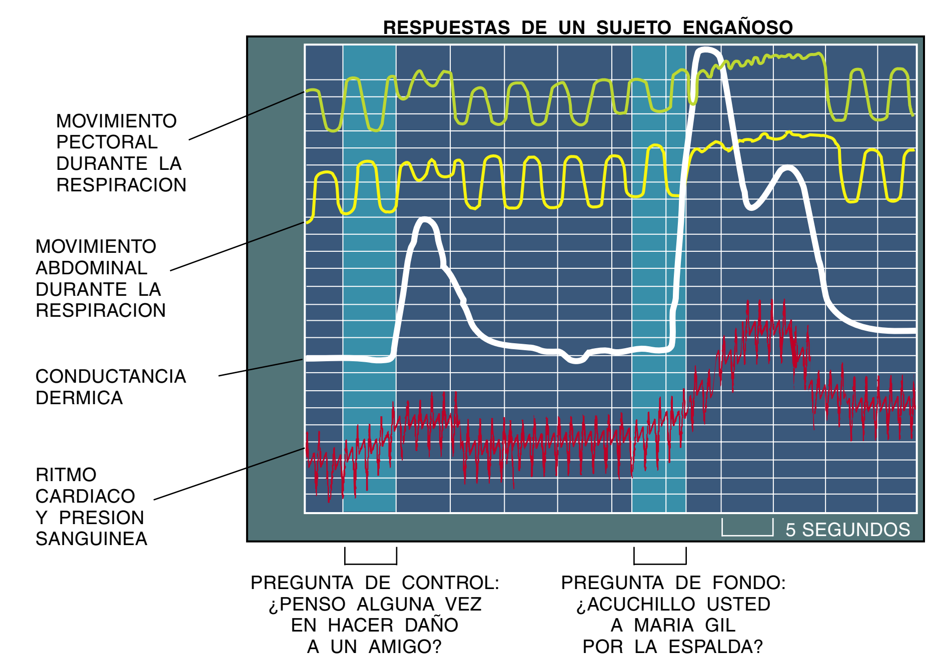
Joel Reicherter

El polígrafo

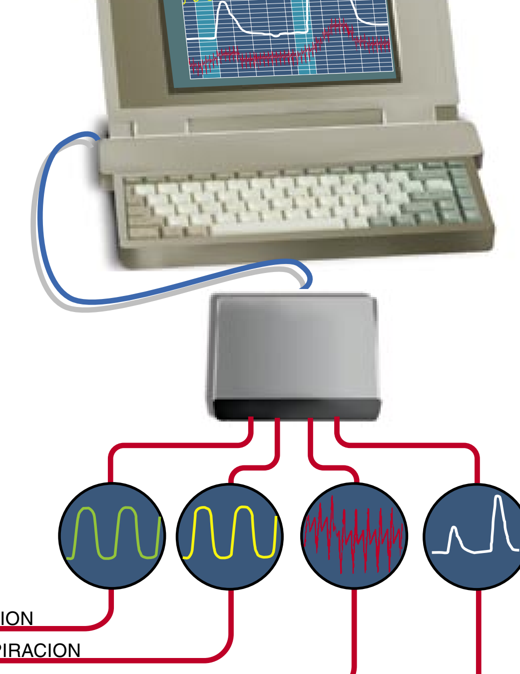
El polígrafo capta la actividad fisiológica que se desarrolla bajo la tensión del engaño. La respiración, el ritmo cardíaco, la presión arterial y la conductividad eléctrica de la piel se alteran en reacción ante preguntas que se perciben como amenazantes. Esa es la razón de por qué la mentira expresada ante una cuestión de dicho tenor pueda detectarla un polígrafo.

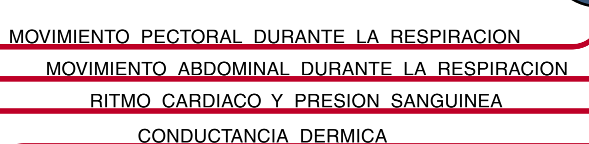
La prueba poligráfica consta de tres fases: entrevista, grabación de la respuesta y análisis de los resultados. El examen poligráfico se reduce a preguntas del tipo sí-o-no. Dos o tres preguntas de fondo conciernen directamente al delito o litigio que provocó la realización del test. Otras —las preguntas de control— se refieren a cosas similares que pudieron ocurrir en otros tiempos.

La validez de una prueba reside en la idea de que alguien que esté mintiendo percibirá la pregunta de fondo ("¿Robó Ud. un millón de la caja de la oficina?") como más amenazante que la difusa pregunta de control ("¿Ha robado Ud. alguna vez algo que valiera más de mil pesetas?"). Por su parte, la persona que dijera la verdad encontraría la pregunta de control embarazosa. Los instrumentos registran las reacciones. Los analistas asignan baremos numéricos a las distintas respuestas que signifiquen ciertos grados de veracidad o engaño.



En las pruebas poligráficas más avanzadas, un ordenador analiza las ondulaciones que representan el ritmo cardíaco y la presión sanguínea, la conductancia dérmica y la dinámica respiratoria. Esos ordenadores emplean algoritmos desarrollados a partir de los resultados de pruebas poligráficas. Esta innovación analítica reduce la posibilidad de que se den resultados desvirtuados por los prejuicios o la incompetencia de un examinador.





Seguiremos explorando los campos del conocimiento



ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS RADIACTIVOS EN EL FONDO DEL MAR, por Charles D. Hollister y Steven Nadis

El enterramiento de los residuos radiactivos bajo sedimentos marinos constituye una solución que debe tomarse muy en cuenta, a pesar de las protestas de algunos grupos ecologistas.

INTERCAMBIO DE GENES BACTERIANOS EN LA NATURALEZA, por Robert V. Miller

El flujo de genes de unas bacterias a otras acontece con una frecuencia insospechada. La investigación realizada en ese dominio permite hacerse una idea más ajustada de los riesgos que entraña la liberación al entorno de microorganismos creados por ingeniería genética.

EVOLUCION DE LAS TORTUGAS, por Guillermo Rougier, Marcelo S. de la Fuente y Andrea Arcucci

El reciente hallazgo de tortugas triásicas en Argentina, cuya antigüedad supera en 60 millones de años las más antiguas conocidas, revela una diversidad ecológica y sistemática inesperada de los quelonios.

LISE MEITNER Y EL DESCUBRIMIENTO DE LA FISION NUCLEAR, por Ruth Lewin Sime

Una de las descubridoras de la fisión nuclear en 1938, Meitner fue ignorada en su momento por el jurado de los Nobel. Una combinación de persecución racial, miedo y oportunismo ocultó sus aportaciones.

ULTRASONIDOS DE PICOSEGUNDOS, por Humphrey Maris

Mediante pulsos brevísimos de alta frecuencia, los ingenieros pueden comprobar la situación de las conexiones en el interior de un chip.

LA MISION ULISES, por Edward J. Smith y Richard G. Marsden

Se trata de la primera sonda espacial que sigue una trayectoria polar en torno al Sol. En su primera vuelta ha cosechado ya importantes descubrimientos.

ARQUITECTURA DE LA VIDA, por Donald E. Ingber

Las estructuras orgánicas, que se rigen por normas de construcción de valor universal, abarcan desde compuestos elementales de carbono hasta células y tejidos, de enorme complejidad.

LEONARDO Y LA INVENCION DE LA LLAVE DE RUEDA, por Vernard Foley

Los cuadernos de Leonardo da Vinci están repletos de invenciones, desde intrincadas piezas de armas a bicicletas y automóviles. Pero, ¿llegó a materializarse alguna durante la vida de quien las concibió?

